

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DIMENSIONAMENTO POR COMPUTADOR
DE VIGAS SIMPLEMENTE APOIADAS
DE CONCRETO PROTENDIDO PÓS-TRACIONADAS**

RALF KLEIN

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL
Orientador: **Prof. Dr. DANIEL DOMINGUES LORIGGIO**

Florianópolis, setembro de 2002

**DIMENSIONAMENTO POR COMPUTADOR
DE VIGAS SIMPLEMENTE APOIADAS
DE CONCRETO PROTENDIDO PÓS-TRACIONADAS**

RALF KLEIN

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, especialidade ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Daniel Domingues Loriggio (Orientador)

Prof. Dr. Jucilei Cordini (Coordenador do Curso)

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a . Henriette Lebre La Rovere, Ph.D. (UFSC)

Prof. Dr. Hideki Ishitani (USP)

Prof. Ivo José Padaratz, Ph.D. (UFSC)

Florianópolis, 13 de setembro de 2002.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DAS PRINCIPAIS NOTAÇÕES.....	8
SIGNIFICADO DOS BLOCOS NOS FLUXOGRAMAS	12
RESUMO	13
ABSTRACT	14
1 INTRODUÇÃO	15
2 FUNDAMENTOS PARA O PROJETO DE VIGAS DE CONCRETO	
PROTENDIDO	19
2.1 Protensão aplicada ao concreto.....	19
2.2 Nível de protensão, combinações de ações e estados limites de serviço	24
2.3 Módulo de elasticidade do concreto	30
2.4 Curvas limite	32
2.5 Traçado geométrico dos cabos de protensão.....	37
2.6 Perdas de protensão no caso de pós-tração.	37
2.6.1 Perdas por atrito	38
2.6.2 Perdas por cravação	40
2.6.3 Perdas elásticas	42
2.6.4 Perdas progressivas	43
3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	46
3.1 Estrutura geral do programa computacional	46
3.2 Esforços internos solicitantes	50
3.2.1 Tela EIS	50
3.2.2 Fluxogramas	51
3.3 Pré-dimensionamento.....	53
3.3.1 Pré-dimensionamento da seção transversal.....	53
3.3.2 Tela PréDim e tela PréDimCab	54
3.3.3 Fluxogramas	56
3.4 Cabos de protensão.....	63
3.4.1 Traçado geométrico dos cabos	63
3.4.2 Cabo equivalente	65
3.4.3 Cordoalhas para protensão.....	65
3.4.4 Tela Cabos	66
3.4.5 Fluxogramas	67
3.5 Perdas de protensão	74
3.5.1 Tela Perdas	74

3.5.2	Fluxogramas	75
3.6	Verificação de tensões	81
3.6.1	Tela VerifTens	81
3.6.2	Fluxogramas	82
4	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	84
4.1	Exemplo 1	85
4.2	Exemplo 2	98
4.3	Exemplo 3	111
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	126
6	ANEXOS.....	133
6.1	Código EIS	133
6.2	Código PréDim	136
6.2.1	Código PréDimCab	144
6.3	Código Cabos	145
6.4	Código Perdas	150
6.5	Código VerifTens	154
6.6	Código de definição das variáveis globais (VarGlob)	159
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conceito da protensão.....	20
Figura 2 - Protensão como carga externa	22
Figura 3 - Protensão como força normal na seção: (a) Deslocamento do centro de pressão; (b) Diagramas de tensões correspondentes.	23
Figura 4 - Posição limite superior do cabo de protensão equivalente	33
Figura 5 - Posição limite inferior do cabo de protensão equivalente.....	35
Figura 6 - Região desejável de localização do cabo de protensão equivalente	35
Figura 7 - Formas ou posições indesejáveis da região de localização do cabo de protensão equivalente.....	36
Figura 8 - Perdas por atrito.....	39
Figura 9 - Perdas por cravação	41
Figura 10 - Diagrama da variação da força de protensão (P) por efeito de um deslocamento δ na extremidade do cabo.....	42
Figura 11 - Fluxograma geral do programa.....	49
Figura 12 - Tela EIS.....	51
Figura 13 - Fluxograma do módulo EIS	52
Figura 14 - Tela PréDim	54
Figura 15 - Tela PréDimCab	55
Figura 16 - Fluxograma geral do módulo PréDim.....	57
Figura 17 - Fluxograma para o módulo de resistência mínimo da seção transversal.....	58
Figura 18 - Fluxograma para pré-dimensionamento da força de protensão.....	59
Figura 19 - Fluxograma 1 para escolha do cabo de protensão de menor seção transversal	60
Figura 20 - Fluxograma 2 para escolha do cabo de protensão de menor seção transversal	61
Figura 21 - Fluxograma para traçar as curvas limite.....	62
Figura 22 - Cabos de protensão usuais em vigas simplesmente apoiadas	63
Figura 23 - Geometria dos cabos	64
Figura 24 - Geometria dos cabos, casos particulares.	64
Figura 25 - Tela Cabos	67
Figura 26 - Fluxograma geral do módulo Cabos	68
Figura 27 - Fluxograma para os parâmetros das curvas dos cabos de protensão	69
Figura 28 - Fluxograma para a excentricidade do cabo de protensão nas seções analisadas	70
Figura 29 - Fluxograma para a soma dos ângulos de desvio previstos para cada cabo de protensão.....	71
Figura 30 - Fluxograma para a excentricidade do cabo de protensão equivalente nas seções analisadas	72
Figura 31 - Fluxograma para a soma dos ângulos de desvio previstos para o cabo de protensão equivalente	73
Figura 32 - Tela Perdas	75
Figura 33 - Fluxograma geral do módulo Perdas	76
Figura 34 - Fluxograma para perdas por atrito	77
Figura 35 - Fluxograma 1 para perdas por cravação.....	78
Figura 36 - Fluxograma 2 para perdas por cravação.....	79

Figura 37 - Fluxograma para perdas elásticas	79
Figura 38 - Fluxograma para perdas progressivas	80
Figura 39 - Tela VerifTens	82
Figura 40 - Fluxograma do módulo VerifTens	83
Figura 41 - Exemplo 1 - Esquema da planta baixa do pavimento da edificação	86
Figura 42 - Exemplo 1 - Esquema da seção transversal da viga	86
Figura 43 - Exemplo 1 - Determinação dos esforços internos solicitantes	89
Figura 44 - Exemplo 1 - Fornecimento da seção transversal, escolha dos cabos de protensão e determinação das curvas limite	89
Figura 45 - Exemplo 1 - Disposição dos cabos de protensão na seção transversal da viga: (a) seção do apoio; (b) seção do meio do vão.	91
Figura 46 - Exemplo 1 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente	93
Figura 47 - Exemplo 1 - Determinação das perdas de protensão.....	93
Figura 48 - Exemplo 1 - Tabelas de verificação de tensões de serviço: (a) seções 01 e 02; (b) seções 05 e 06.....	96
Figura 49 - Exemplo 2 - Esquema da seção transversal da viga	98
Figura 50 - Exemplo 2 - Determinação dos esforços internos solicitantes	100
Figura 51 - Exemplo 2 - Fornecimento da seção transversal, escolha dos cabos de protensão e determinação das curvas limite (5 cabos).100	
Figura 52 - Exemplo 2 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente (5 cabos)	103
Figura 53 - Exemplo 2 - Determinação das perdas de protensão (5 cabos) ...	103
Figura 54 - Exemplo 2 - Tabelas de verificação de tensões de serviço (5 cabos): (a) seções 04 e 05; (b) seções 10 e 11.....	105
Figura 55 - Exemplo 2 - Fornecimento da seção transversal, escolha dos cabos de protensão e determinação das curvas limite (4 cabos).107	
Figura 56 - Exemplo 2 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente (4 cabos)	108
Figura 57 - Exemplo 2 - Determinação das perdas de protensão (4 cabos) ...	108
Figura 58 - Exemplo 2 - Tabelas de verificação de tensões de serviço (4 cabos): (a) seções 01 e 02; (b) seções 10 e 11.....	110
Figura 59 - Exemplo 3 - Esquema da seção transversal da viga	111
Figura 60 - Exemplo 3 - Determinação dos esforços internos solicitantes	114
Figura 61 - Exemplo 3 - Fornecimento da seção transversal, escolha dos cabos de protensão e determinação das curvas limite	114
Figura 62 - Exemplo 3 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente (6 cabos)	117
Figura 63 - Exemplo 3 - Determinação das perdas de protensão (6 cabos) ...	117
Figura 64 - Exemplo 3 - Tabelas de verificação de tensões de serviço (6 cabos): (a) seções 01 e 02; (b) seções 08 e 09.....	119
Figura 65 - Exemplo 3 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente (4 cabos)	122
Figura 66 - Exemplo 3 - Determinação das perdas de protensão (4 cabos) ...	122
Figura 67 - Exemplo 3 - Tabelas de verificação de tensões de serviço (4 cabos): (a) seções 01 e 02; (b) seções 08 e 09.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental	26
Tabela 2 - Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição	26
Tabela 3 - Nível de protensão, combinações de ações e estados limite de serviço em função da classe de agressividade ambiental e do caso de protensão.....	27
Tabela 4 - Fatores de redução para cargas acidentais de edifícios	29
Tabela 5 - Raios mínimos de curvatura de cabos com bainha corrugada	37
Tabela 6 - Comparação de resultados de duas soluções para o exemplo 2 ...	109

LISTA DAS PRINCIPAIS NOTAÇÕES

Letras romanas

A_c	- Área da seção transversal da viga
A_p	- Área da seção transversal do cabo de protensão
A_{pe}	- Área da seção transversal do cabo de protensão equivalente
d_y	- Coeficiente angular do cabo de protensão numa determinada abcissa
d_{y1}	- Coeficiente angular do cabo de protensão na 1ª seção da viga
d_{ynsec}	- Coeficiente angular do cabo de protensão na última seção da viga
$e_{p(Cabo, Seção)}$	- Excentricidade do cabo de protensão em relação ao baricentro da seção transversal, numa determinada seção; valores positivos acima do baricentro
$e_{pe}(Seção)$	- Excentricidade do cabo de protensão equivalente em relação ao baricentro da seção transversal, numa determinada seção; valores positivos acima do baricentro
$e_{pepré}$	- Excentricidade do cabo de protensão equivalente em relação ao baricentro da seção transversal, na seção do meio do vão; valores positivos acima do baricentro
E_{ci}, E_c	- Módulo de elasticidade inicial do concreto
E_{cs}	- Módulo de elasticidade secante do concreto
E_{sp}	- Módulo de elasticidade do aço da armadura ativa
f_{ck}	- Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias de idade
$f_{\alpha j}$	- Resistência característica do concreto à compressão aos j dias de idade
f_{ptk}	- Resistência característica à tração do aço da armadura ativa
f_{pyk}	- Resistência característica de escoamento do aço da armadura ativa
g_1	- Carregamento permanente inicial, mobilizado por ocasião da protensão

g_2	- Carregamento permanente aplicado após a protensão
h	- Altura da seção transversal da viga
I	- Momento de inércia da seção transversal da viga em relação ao eixo baricêntrico horizontal
j_{prot}	- Idade do concreto em dias, por ocasião da protensão
l	- Vão da viga
n_{sec}	- Número de seções a serem consideradas na análise da viga (número de trechos nos quais foi discretizada a viga + 1)
n_{cab}	- Número de cabos de protensão
$n_{cabmáx}$	- Número máximo de cabos de protensão a serem utilizados na viga
$P_a(\text{Seção})$	- Força de protensão no cabo equivalente, numa determinada seção, após as perdas por atrito
$P_c(\text{Seção})$	- Força de protensão no cabo equivalente, numa determinada seção, após as perdas por deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem (perdas por cravação)
P_i	- Força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração
$P_0(\text{Seção})$	- Força de protensão no cabo equivalente, numa determinada seção, após as perdas por encurtamento elástico do concreto \equiv Força de protensão no cabo equivalente, numa determinada seção, após a ocorrência de todas as perdas imediatas de protensão
$P_\infty(\text{Seção})$	- Força de protensão no cabo equivalente, numa determinada seção, após a ocorrência de todas as perdas de protensão (imediatas e progressivas)
q	- Carregamento acidental
$x_0(\text{Cabo})$	- Abcissa do ponto de início do cabo de protensão
$x_1(\text{Cabo})$	- Abcissa do ponto de início do trecho horizontal do cabo de protensão
$x(\text{Seção})$	- Abcissa de determinada seção
$y_0(\text{Cabo})$	- Ordenada do ponto de início do cabo de protensão

$y_1(\text{Cabo})$	- Ordenada do ponto de início do trecho horizontal cabo de protensão
y_c	- Altura do baricentro da seção transversal da viga
w_k	- Abertura característica limite de fissuras na superfície do concreto
W_i	- Módulo de resistência elástico da seção transversal relativo à borda Inferior
W_s	- Módulo de resistência elástico da seção transversal relativo à borda superior

Letras gregas

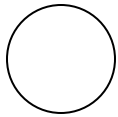
δ	- Deslocamento do cabo de protensão por deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem
$\Delta\sigma_p$	- Perda de tensão média por cabo de protensão devido ao encurtamento imediato do concreto
$\Delta\sigma_{p,c+s}$	- Perda de tensão no cabo de protensão equivalente devido à retração do concreto e à fluência do concreto
$\Delta\sigma_{p,c+s+r}$	- Perda de tensão no cabo de protensão equivalente devido à retração e fluência do concreto e à relaxação da armadura de protensão
$\varepsilon_{cs,\infty}$	- Valor final da deformação específica por retração do concreto
μ	- Coeficiente de atrito aparente entre cabo de protensão e bainha
$\sigma_{cp,g1}$	- Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão devido à carga permanente mobilizada por ocasião da protensão (g_1)
$\sigma_{cp,g}$	- Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão devido à totalidade da carga permanente ($g_1 + g_2$)
$\sigma_{cp,p}$	- Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devido à força P_c

$\sigma_{cp,p0}$	- Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão devido à força P_0
σ_{p0}	- Tensão na armadura ativa devido à força P_0
σ_{ELS-CE}	- Tensão limite no concreto correspondente ao estado limite de serviço de compressão excessiva
σ_{ELS-D}	- Tensão limite no concreto correspondente ao estado limite de serviço de descompressão
σ_{ELS-F}	- Tensão limite no concreto correspondente ao estado limite de serviço de formação de fissuras
$\sum\alpha(\text{Cabo,Seção})$	- Soma dos ângulos de desvio previstos para o cabo de protensão, entre a seção de aplicação da força de protensão e a seção considerada; medido em radianos
$\sum\alpha_e(\text{Seção})$	- Soma dos ângulos de desvio previstos para o cabo de protensão equivalente, entre a seção de aplicação da força de protensão e a seção considerada; medido em radianos
ϕ_∞	- Valor final do coeficiente de fluência do concreto
ψ_1	- Fator de redução de ações variáveis para combinações freqüentes
ψ_2	- Fator de redução de ações variáveis para combinações quase-permanentes
ψ_{70}	- Relaxação de fios e cordoalhas para protensão, após 1000h, a 20°C, para 70% da carga de ruptura
ψ_{80}	- Relaxação de fios e cordoalhas para protensão, após 1000h, a 20°C, para 80% da carga de ruptura
ψ_∞	- Valor final da relaxação de fios e cordoalhas para protensão

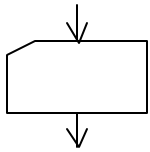
SIGNIFICADO DOS BLOCOS NOS FLUXOGRAMAS



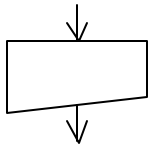
Início, fim



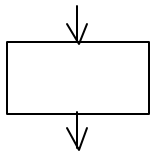
Continuação



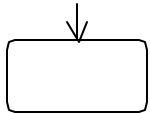
Entrada



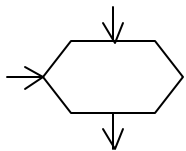
Saída



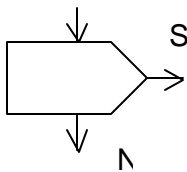
Instrução



Processo



Controle iterativo



Controle condicional

RESUMO

O dimensionamento e detalhamento de vigas de concreto protendido é um processo iterativo demandando muito trabalho rotineiro de engenharia. Como consequência tem-se a introdução de simplificações com perda de precisão nos resultados. Programas computacionais para o projeto de elementos estruturais de concreto protendido ainda são poucos. Neste trabalho, foram desenvolvidos procedimentos e rotinas computacionais, para o dimensionamento aos Estados Limites de Serviço, de vigas simplesmente apoiadas de concreto protendido, pós-tracionadas. Pretende-se com a disponibilização desta ferramenta computacional estimular a utilização do concreto protendido, além de contribuir para a obtenção de soluções melhores em termos técnicos, econômico-financeiros, sociais e ambientais. Fornecendo o vão e o carregamento da viga, o nível de protensão desejado e as características dos materiais a serem utilizados na sua fabricação, o programa indicará o módulo de resistência mínimo que deve ter a seção transversal. Adotada uma seção transversal para a viga, o programa escolherá automaticamente os cabos de protensão, visando minimizar o consumo de aço. O lançamento dos cabos de protensão é feito de forma semi-automática, ou seja, com a participação do usuário. Com o traçado dos cabos definido serão calculadas as perdas de protensão e a seguir as tensões normais nas bordas das diversas seções, para que possam ser comparadas com as tensões limite. O aplicativo foi desenvolvido na linguagem de programação Visual Basic. As rotinas consideram os conhecimentos atuais da técnica do concreto protendido. São apresentados vários exemplos de vigas resolvidas com o programa desenvolvido. Os resultados, obtidos com o programa, foram comparados aos obtidos por outros autores. Estudou-se a utilização da região delimitada pelas curvas limite para fins de lançamento automático dos cabos de protensão. Com base nos gráficos da força de protensão após as perdas, feitos pelo aplicativo, foram obtidas conclusões importantes com relação às perdas de protensão.

ABSTRACT

The design and specification of prestressed concrete beams is an iterative process that demands a lot of routine engineering work. Because of this, simplifications are introduced which lead to an inherent loss of precision. There are not many computer aided design programs for prestressed concrete. Procedures and routines for the design and specification of simply supported prestressed concrete beams are developed in this work. This computer program aims to encourage the use of prestressed concrete and contribute to the improvement of technical, economical, financial solutions with consideration both social and environmental issues. Given the length of span, beam loading, the desired level of prestress and material characteristics, the program aims to calculate the expected minimum specification for cross-section geometry. Once a cross-section has been specified the program will automatically choose the prestressing tendons. The positioning of the tendons is performed semiautomatically and requires input from the user. The prestressing losses are determined when the layout of the tendons is defined. The normal stresses at the borders of several sections are then calculated and compared to the limit stresses. The program was developed using Visual Basic and a contemporary knowledge of the behaviour of prestressed concrete. Several examples of beams modelled by the developed program are presented and compared to results obtained by other authors. Studies regarding the use of the area defined by the limiting curves for the steel centroid with an intention of the automatic positioning of the prestressing tendons were carried out. Important conclusions, based on graphs plotted by the program, were obtained regarding the prestressing losses.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de peças de concreto protendido apresenta muitas vantagens em relação às peças de concreto armado em vários aspectos tais como os de engenharia, econômico- financeiros, sociais e ambientais.

Com vigas de concreto protendido consegue-se vencer maiores vãos em comparação às de concreto armado. Nas peças de concreto protendido, pode-se eliminar a fissuração, fato que tem efeito direto na durabilidade do elemento estrutural. Maiores vãos e maior durabilidade significa que se pode gastar menos matéria prima e utilizá-la durante maior espaço de tempo. Isto gera economia de recursos materiais e naturais. A economia de recursos naturais gera aspectos ambientais positivos. A economia de recursos materiais permite que estes sejam utilizados em outros empreendimentos, fato relevante sobremaneira no Brasil.

O projeto de uma viga de concreto protendido consiste de uma extensa seqüência de passos com elevada demanda de tempo. Além disso, o projeto é um processo iterativo, pois dificilmente se encontrará a melhor solução na primeira tentativa. Se esta tarefa tiver que ser desenvolvida manualmente ou com o auxílio de ferramentas computacionais parciais (programas para determinadas etapas), possivelmente levará a uma abreviação do trabalho antes de se encontrar a solução ideal.

Atualmente os programas computacionais voltados ao concreto protendido são desenvolvidos por alguns escritórios de engenharia, para uso exclusivo desses mesmos escritórios, como outrora acontecia com os programas computacionais para concreto armado. Existe, assim, uma carência de programas computacionais para projeto de estruturas de concreto protendido, o que tem contribuído para a não utilização desta técnica em benefício da utilização do concreto armado que dispõe de inúmeros programas computacionais, largamente comercializados no mercado.

Este fato levou a uma parceria entre a TQS Informática (empresa de desenvolvimento de software para engenharia estrutural, sediada em São Paulo), a Mac Protensão (empresa prestadora de serviços na área de concreto protendido, sediada no Rio de Janeiro) e a Cia. Siderúrgica Belgo Mineira (fabricante de aços para protensão, sediada em Minas Gerais). Esta parceria levou ao desenvolvimento do primeiro programa computacional brasileiro para o dimensionamento e detalhamento de vigas contínuas de concreto protendido, recentemente lançado.

Os programas computacionais comerciais, além do considerável preço que possuem, são programas fechados, ou seja, não permitem acesso ao código do programa, aos procedimentos do programa e especialmente à teoria envolvida no seu desenvolvimento. Simplificações podem ter sido introduzidas na elaboração do programa, e estas são impostas, imutáveis e sobremaneira desconhecidas.

Com o aperfeiçoamento dos materiais e acessórios que são utilizados na confecção das peças de concreto protendido, dos equipamentos necessários que se tornam cada vez menores e menos dispendiosos, o concreto protendido vem experimentando, nestes últimos tempos, significativos impulsos na sua utilização.

Uma das razões pelas quais o concreto protendido não é largamente utilizado é de ordem tecnológica, ou seja, carência de ferramentas e profissionais de projeto e execução envolvidos com esta técnica. Daí decorre a idéia central do presente trabalho, qual seja, a de contribuir para o desenvolvimento de um programa computacional para o projeto de vigas simplesmente apoiadas de concreto protendido, pós-tracionadas .

O programa computacional desenvolvido considera vigas prismáticas de seção transversal com pelo menos um eixo de simetria, que deve estar na posição vertical. Os cabos de protensão deverão ter traçado parabólico e/ou retilíneo e ancoragens ativas em ambas extremidades da viga. O programa abrange o

dimensionamento da viga aos estados limites de serviço. Mais detalhes com relação aos recursos e limitações do programa podem ser vistos no Capítulo 3.

Este programa computacional pode se constituir numa ferramenta de ensino e pesquisa de grande valor, estimulando a utilização do concreto protendido. Pode ser utilizada por professores e alunos no ensino e aprendizado desta técnica e, tratando-se de um programa totalmente aberto (código, procedimentos e teoria disponibilizados neste texto), permite ser complementado, abrindo espaço para futuros trabalhos.

No campo dos profissionais de engenharia estrutural, pode servir como ponto de partida para o desenvolvimento de um aplicativo para fins de projeto de vigas de concreto protendido. Como exemplo temos o caso da Stábil Engenharia de Porto Alegre, que atualmente está lançando no mercado um sistema computacional para projeto de estruturas metálicas; a origem e o núcleo deste programa foi a dissertação de mestrado do Engenheiro Civil e Professor Paulo Marcondes de Carvalho.

As curvas limite (ver item 2.4) determinam uma região na viga, dentro da qual deverá estar o cabo de protensão equivalente (ver item 3.4.2), para que as tensões nas seções transversais da viga fiquem dentro de certos limites. Presentemente, o lançamento dos cabos de protensão é feito com o auxílio do usuário. Pretende-se implementar, futuramente, no programa, um lançamento automático de cabos de protensão balizado pela curvas limite. Para tanto foram observadas as tensões (ver exemplos do Capítulo 4) nas bordas da viga em função da posição do cabo equivalente relativamente a estas curvas.

No desenvolvimento dos procedimentos de determinados módulos (ver descrição dos módulos no Capítulo 3), foram aplicados conhecimentos teóricos, muitas vezes não utilizados no exercício da atividade profissional de engenharia estrutural. Embora alguns desses conhecimentos teóricos constem da literatura referenciada, para simplificação do processo de dimensionamento, deixam de ser aplicados. Como exemplo pode ser citado o cálculo das perdas de protensão por relaxação da armadura de protensão. Estas perdas são, na

realidade, dependentes da retração e fluência do concreto, mas, algumas vezes, são consideradas como sendo independentes; no programa desenvolvido, considerou-se a interdependência delas.

O presente texto foi dividido em introdução, fundamentos para o projeto de vigas de concreto protendido, implementação computacional, exemplos de aplicação, conclusões e recomendações e anexos.

No Capítulo 2, fundamentos para o projeto de vigas de concreto protendido, abordam-se aspectos teóricos considerados relevantes no desenvolvimento do programa computacional.

No Capítulo 3, de implementação computacional, é apresentada a estrutura do programa, a descrição da sua operação e, grande importância foi dada aos fluxogramas pelo fato de permitirem uma rápida visualização da lógica das principais rotinas e da teoria aplicada.

Na seqüência, são resolvidos alguns exemplos, propostos por outros autores, já resolvidos manualmente ou com o auxílio de outras ferramentas computacionais parciais. Os resultados foram analisados e comparados.

Em conclusões e recomendações, são também deixadas sugestões para trabalhos futuros.

O código do programa foi incluído nos anexos.

2 FUNDAMENTOS PARA O PROJETO DE VIGAS DE CONCRETO PROTENDIDO

Neste capítulo, são abordados fundamentos teóricos do projeto de vigas de concreto protendido. Foram consultadas publicações de diversos autores e várias normas, e se compilaram aqui os procedimentos mais recentes relacionados ao assunto. Alguns desses estão sendo introduzidos pela NBR 6118:2001 - Projeto de estruturas de concreto. Como esta norma ainda se encontra em fase de aprovação, é conveniente lembrar que alguns dos procedimentos aqui apresentados e também aplicados no programa computacional carecem de regulamentação.

São tratados aqui entre outros:

- As diferentes maneiras de considerar a protensão ao analisar elementos estruturais protendidos.
- A forma de definir o nível de protensão mínimo que deve ter o elemento estrutural, as combinações de ações a considerar e os correspondentes estados limite de serviço a serem atendidos.
- A determinação do módulo de elasticidade do concreto de acordo com nova norma de concreto.
- O conceito de curvas limite e sua aplicação no projeto de vigas de concreto protendido.
- Os procedimentos para o cálculo das perdas de protensão, que foram considerados no programa computacional desenvolvido.

2.1 Protensão aplicada ao concreto

A protensão é um artifício que consiste em aplicar esforços prévios a uma estrutura, esforços estes capazes de melhorar o desempenho da estrutura, quando da ação de outras cargas.

O conceito da protensão é bastante antigo, tanto que já era utilizado na fabricação de rodas de carroça, barris de madeira, etc. (Figura 1).

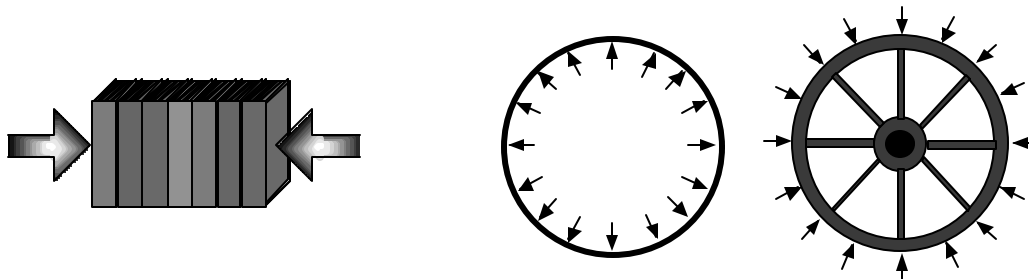


Figura 1 - Conceito da protensão [Loriggio, 1999]

A idéia de usar a protensão em estruturas de concreto data do início dos anos 1900. As primeiras experiências, no entanto, não foram bem sucedidas por terem sido utilizados aços de baixa resistência e com isto se perdia o efeito da protensão devido à retração e fluência (deformação lenta) do concreto, e à relaxação da armadura de protensão.

Freyssinet, por volta de 1930, desenvolveu o concreto protendido, utilizando aços da alta resistência.

No Brasil, a primeira construção a utilizar elementos de concreto protendido foi a ponte do Galeão no Rio de Janeiro, concluída em 1949. Esta obra foi a primeira do continente americano a se valer de elementos de concreto protendido e, na época, era a maior do mundo em comprimento (380m). Foi executada com vigas pré-moldadas pós-tracionadas, utilizando o sistema Freyssinet. A viga de maior vão tem 43,40 m [Vasconcelos,1992].

As condições gerais exigíveis no projeto das estruturas de concreto protendido são ditadas no Brasil, ainda pela NBR 7197/1989 - Projeto de estruturas de concreto protendido, que trata, unicamente, das estruturas de concreto protendido.

As condições gerais que devem ser obedecidas no projeto das estruturas de concreto armado são fixadas na NBR 6118/1980 - Projeto e execução de obras de concreto armado.

Acompanhando uma tendência mundial, o projeto de revisão da NBR 6118:2001 - Projeto de estruturas de concreto, reuniu em uma só norma os critérios gerais que regem o projeto das estruturas de concreto simples, de concreto armado e de concreto protendido. Os critérios da NBR 7197/1989 basicamente se mantêm na NBR 6118:2001.

A maioria dos conceitos aplicados no estudo das peças de concreto protendido são tradicionais e consagrados e, constam na literatura clássica sobre o assunto como Pfeil [Pfeil, 1998] [Pfeil, 1983] e Leonhardt [Leonhardt, 1983].

Idéias e conceitos complementares aos tradicionais acima mencionados são apresentados em textos mais recentes como Loriggio [Loriggio, 1999] e Veríssimo [Veríssimo, 1998].

Com relação ao projeto de peças de concreto protendido assistido por computador poucos trabalhos foram localizados, entre eles pode-se mencionar Aparício [Aparício, 1996], Veríssimo [Veríssimo, 1998] e Pontes [Pontes, 2000].

A idéia básica da protensão em peças de concreto consiste em introduzir na peça as chamadas forças de protensão, que, ao agirem simultaneamente com as demais ações, anulam ou limitam a valores baixos as tensões de tração no concreto.

Surgiram, mais recentemente, outras maneiras de considerar a protensão para analisar o comportamento dos elementos estruturais protendidos. Conhecem-se, atualmente, três maneiras de considerar a protensão em estruturas, previstas também na NBR 6118:2001.

1. Através de um conjunto de cargas externas equivalentes (Figura 2).

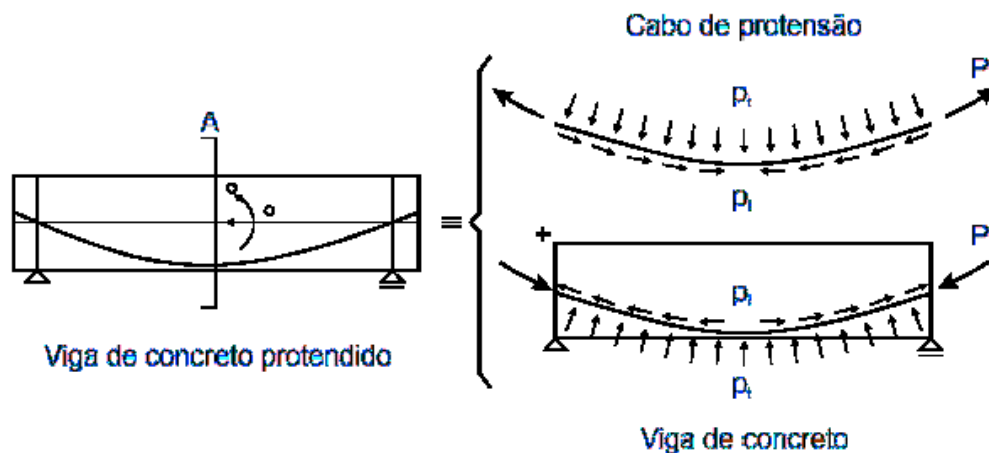


Figura 2 - Protensão como carga externa (NBR 6118:2001)

Para análise da viga de concreto, consideram-se a força de protensão nas extremidades da viga e a ação das forças longitudinais de atrito e das forças transversais de curvatura dos cabos.

Esta maneira de considerar a protensão é usada, principalmente, na análise de estruturas hiperestáticas.

2. Através da introdução de deformações impostas, correspondentes ao pré-alongamento da armadura de protensão.

A armadura de protensão é considerada como uma armadura convencional que sofreu um pré-alongamento, decorrente da protensão.

Esta forma de considerar a protensão é utilizada para a verificação das peças de concreto protendido no Estado Limite Último.

3. Como uma força normal aplicada na seção transversal da viga, na posição de passagem do cabo de protensão (Figura 3).

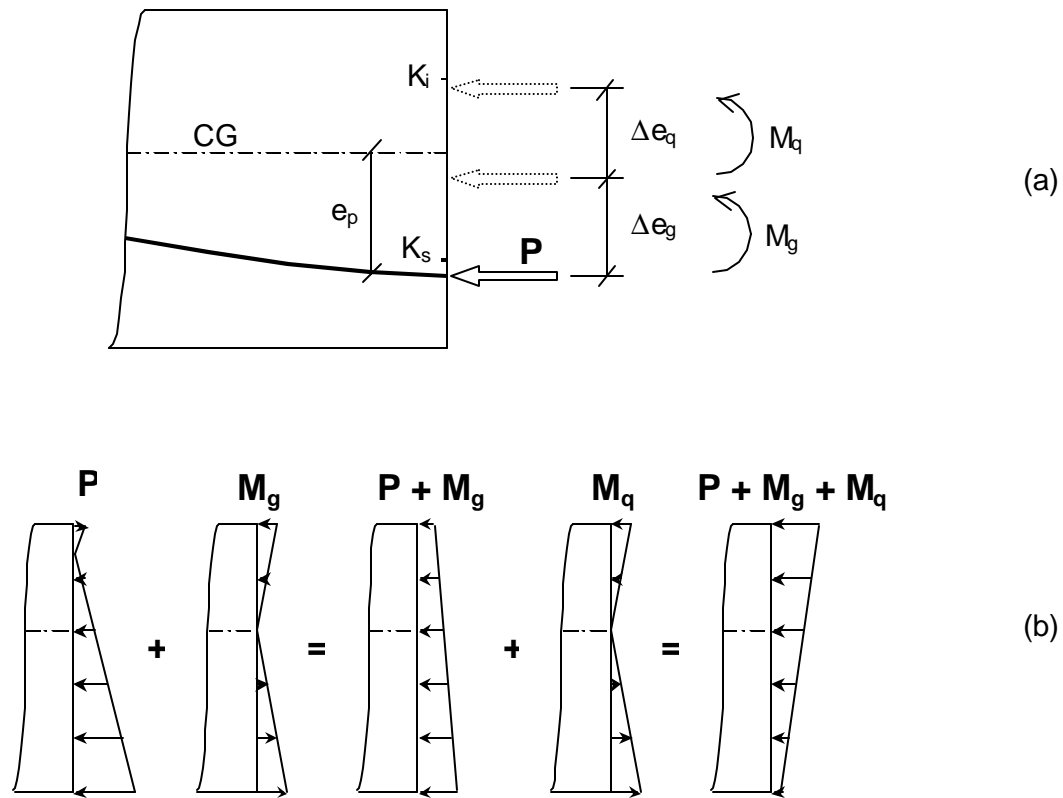


Figura 3 - Protensão como força normal na seção: (a) Deslocamento do centro de pressão; (b) Diagramas de tensões correspondentes.

A força normal (P) corresponde à força de protensão do cabo, já descontadas as perdas de protensão, nas diversas seções consideradas ao longo da viga. A rigor se deveria considerar a força de protensão com a inclinação do cabo na seção. Como esta inclinação nos problemas reais é pequena, admitir-se-á, no desenvolvimento do programa computacional, a componente normal desta força igual à própria força de protensão.

A ação dos carregamentos externos (M_g , M_q) deslocará o centro de pressão (Δe_g , Δe_q), este porém não deverá ultrapassar os limites do núcleo central de inércia (K_i , K_s) ou do núcleo limite da seção transversal, para que as tensões normais na seção fiquem numa faixa de valores pré-estabelecidos.

Esta maneira de considerar a protensão é usada na análise de estruturas isostáticas. Esta foi também a maneira utilizada no desenvolvimento do programa computacional que integra este trabalho.

2.2 Nível de protensão, combinações de ações e estados limites de serviço

Anteriormente à publicação da NBR 8681/1984 - Ações e segurança nas estruturas, as verificações de projeto com relação ao atendimento dos estados limites de serviço, das vigas de concreto protendido, eram feitas de maneira mais simplificada. Para as combinações de ações, tomavam-se as ações com seus valores integrais combinadas da maneira mais desfavorável.

Com a NBR 8681/1984, estes procedimentos foram aperfeiçoados. Nas combinações de ações, as ações variáveis passaram a ser ponderadas de acordo com a frequência de atuação da ação. Mais à frente, neste item, será detalhadamente analisada a forma de se considerar as ações variáveis nas combinações de ações.

Para a verificação da peça protendida, com relação aos estados limites de serviço relacionados a tensões, é necessário seguir uma rotina que compreende basicamente:

- A determinação da classe de agressividade ambiental a que o elemento está submetido.
- O estabelecimento do nível mínimo de protensão que deve ter a peça de acordo com a classe de agressividade ambiental.
- A determinação das combinações de ações que devem ser consideradas para o nível de protensão desejado.
- A definição dos estados limites de serviço que devem ser atendidos nas combinações de ações consideradas.
- A fixação das condições para atendimento dos estados limites de serviço.

As orientações a serem seguidas, com relação aos itens acima mencionados, encontram-se descritas nas normas brasileiras, como a NBR 7197/1989, a NBR 8681/1984, a NBR 7187/1987 e a NBR 6118:2001. Neste item, as orientações atuais foram organizadas e dispostas de maneira didática, inclusive com exemplificações.

A agressividade do meio ambiente às estruturas de concreto pode ser classificada de acordo com a Tabela 1.

A classe de agressividade ambiental pode ser avaliada de maneira simplificada pela Tabela 2, em função do macro e micro clima em que se situa a peça estrutural.

O nível de protensão de uma peça estrutural está relacionado à intensidade da força de protensão, determinando, assim, o grau de fissuração dessa peça. O nível de protensão mínimo que o elemento estrutural deve apresentar, depende da classe de agressividade ambiental e do caso de protensão da peça (pós ou pré-tração), conforme mostrado na Tabela 3. O caso de protensão refere-se a um dos dois tipos de protensão possíveis. O concreto com armadura ativa pré-tracionada é aquele em que o pré-alongamento da armadura é feito utilizando-se apoios independentes da peça, antes do lançamento do concreto. O concreto com armadura ativa pós-tracionada é aquele em que o pré-alongamento da armadura é realizado após o endurecimento do concreto, utilizando-se como apoios, partes da própria peça. A Tabela 3 também nos fornece as combinações de ações e os respectivos estados limites de serviço que devem ser atendidos em função do nível de protensão.

A combinação das ações para as combinações de serviço devem ser feitas conforme abaixo indicado [NBR 8681/1984] [NBR 6118:2001].

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental [NBR 6118:2001]

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

Tabela 2 - Classes de agressividade ambiental em função das condições de exposição [NBR 6118:2001]

Macro-clima	Micro-clima			
	Ambientes internos		Ambientes externos e obras em geral	
	Seco ¹⁾ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ²⁾ de molhagem e secagem	Seco ³⁾ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ⁴⁾ de molhagem e secagem
Rural	I	I	I	II
Urbana	I	II	I	II
Marinha	II	III	-----	III
Industrial	II	III	II	III
Especial ⁵⁾	II	III ou IV	III	III ou IV
Respingos de maré	-----	-----	-----	IV
Submersa ≥ 3m	-----	-----	-----	I
Solo	-----	-----	Não agressivo I	Úmido e agressivo II, III ou IV

¹⁾ Salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura.
²⁾ Vestiários, banheiros, cozinhas, lavanderias industriais e garagens.
³⁾ Obras em regiões secas, como o nordeste do país, partes protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos.
⁴⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.
⁵⁾ Macro-clima especial significa ambiente com agressividade bem conhecida, que permitirá definir a classe de agressividade III ou IV nos ambientes úmidos. Se o ambiente for seco, a classe de agressividade será sempre II, nos ambientes internos, e III, nos externos.

Tabela 3 - Nível de protensão, combinações de ações e estados limite de serviço em função da classe de agressividade ambiental e do caso de protensão [NBR 6118:2001]

Classe de agressividade ambiental e caso de protensão	Nível de protensão mínimo	Combinações de ações a considerar	Estados limites de serviço a serem atendidos
Pré-tração I ou Pós-tração I e II	Concreto protendido nível 1 (Protensão parcial)	Freqüente	ELS-W ($w_k \leq 0,2\text{mm}$)
		Quase permanente	ELS-F
Pré-tração II ou Pós-tração III e IV	Concreto protendido nível 2 (Protensão limitada)	Freqüente	ELS-F
		Quase permanente	ELS-D
Pré-tração III e IV	Concreto protendido nível 3 (Protensão completa)	Rara	ELS-F
		Freqüente	ELS-D

Notas: ELS-W Estado limite de serviço - Abertura de fissuras, ELS-F Estado limite de serviço - Formação de fissuras, ELS-D Estado limite de serviço - Descompressão

- Combinações raras de serviço (CR)

Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal F_{q1} é considerada com seu valor característico $F_{q1,k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores freqüentes $\psi_1 \cdot F_{qk}$

$$F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{gi,k} + F_{q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{1j} \cdot F_{qj,k}$$

$F_{d,ser}$ - Valor de cálculo das ações para combinações de serviço

$F_{g,k}$ - Valor característico da ação permanente

$F_{q,k}$ - Valor característico da ação variável

ψ_1 - Fator de redução de ações variáveis para as combinações freqüentes

ψ_2 - Fator de redução de ações variáveis para as combinações quase-permanentes

No caso de existir apenas uma ação variável, e supondo que a metade das perdas progressivas ($0,5 \cdot \Delta P_{c+s+r}$) ocorra na fase de construção, como exemplo de uma combinação rara de serviço pode-se ter:

$$F_{d,ser} = P_0 + g_1 + g_2 + 0,5 \cdot \Delta P_{c+s+r} + 1,0 \cdot q + 0,5 \cdot \Delta P_{c+s+r}$$

- P_0 - Força de protensão no cabo equivalente, após a ocorrência de todas as perdas imediatas de protensão
- g_1 - Carregamento permanente inicial, mobilizado por ocasião da protensão
- g_2 - Carregamento permanente aplicado após a protensão
- q - Carregamento accidental
- ΔP_{c+s+r} - Perdas progressivas de protensão no cabo equivalente

- Combinações freqüentes de serviço (CF)

Nas combinações freqüentes de serviço, a ação variável principal é tomada com seu valor freqüente $\psi_1.F_{q1,k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase-permanentes $\psi_2.F_{qk}$.

$$F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{gi,k} + \gamma_1.F_{q1,k} + \sum_{j=2}^n \gamma_{2j}.F_{qj,k}$$

No caso de existir apenas uma ação variável, e supondo que a metade das perdas progressivas ($0,5.\Delta P_{c+s+r}$) ocorra na fase de construção, como exemplo de uma combinação freqüente de serviço pode-se ter:

$$F_{d,ser} = P_0 + g_1 + g_2 + 0,5.\Delta P_{c+s+r} + \psi_1.q + 0,5.\Delta P_{c+s+r}$$

- Combinações quase-permanentes de serviço (CQP)

Nas combinações quase-permanentes de serviço, todas as ações variáveis são tomadas com seus valores quase-permanentes $\psi_2.F_{qk}$.

$$F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{gi,k} + \sum_{j=1}^n \gamma_{2j}.F_{qj,k}$$

No caso de existir apenas uma ação variável, e supondo que a metade das perdas progressivas ($0,5.\Delta P_{c+s+r}$) ocorra na fase de construção, como exemplo de uma combinação freqüente de serviço pode-se ter:

$$F_{d,ser} = P_0 + g_1 + g_2 + 0,5.\Delta P_{c+s+r} + \psi_2.q + 0,5.\Delta P_{c+s+r}$$

Na Tabela 4, são apresentados fatores de redução para as cargas accidentais de edifícios.

Tabela 4 - Fatores de redução para cargas acidentais de edifícios
 [NBR 8681/1984]

Cargas acidentais de edifícios	y₁	y₂
Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, nem de elevada concentração de pessoas.	0,3	0,2
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas.	0,6	0,4
Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens.	0,7	0,6

A conceituação dos estados limite de serviço acima considerados e as condições para sua verificação estão descritos abaixo.

- Estado Limite de Compressão Excessiva (ELS-CE)

Estado em que as tensões de compressão no concreto atingem o limite convencional estabelecido, ou seja, quando as tensões na seção transversal da peça fl etida respeitam:

$$|\sigma_c| \leq 0,7f_{dk} \quad \text{na fase de aplicação da protensão [NBR 7197/1989]}$$

$$|\sigma_c| \leq 0,6f_{ck} \quad \text{em qualquer fase [NBR 7187/1987] [Loriggio, 1999]}$$

σ_c - Tensão de compressão no concreto

σ_t - Tensão de tração no concreto

f_{ck} - Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias de idade

f_{dk} - Resistência característica do concreto à compressão aos j dias de idade

Permite-se que as tensões normais sejam calculadas com o concreto em regime elástico linear [NBR 7197/1989].

- Estado Limite de Descompressão (ELS-D) [NBR 7197/1989] [NBR 6118:2001]

Estado em que em um ou mais pontos da seção transversal a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção, ou seja:

$$\sigma_c \leq 0$$

- Estado Limite de Formação de Fissuras (ELS-F) [NBR 6118:2001]

Estado em que se inicia a formação de fissuras. Admite-se considerar atingido este estado limite quando a tensão de tração máxima na seção transversal não respeitar:

$$\sigma_t \leq 0,25f_{ck}^{2/3} \text{ (em MPa)} \quad \text{para peças de seção T ou duplo T}$$

$$\sigma_t \leq 0,32f_{ck}^{2/3} \text{ (em MPa)} \quad \text{para peças de seção retangular}$$

Esta máxima tensão de tração é calculada com o concreto no Estádio I (concreto não fissurado e comportamento elástico linear dos materiais).

- Estado Limite de Abertura de Fissuras (ELS-W) [NBR 6118:2001]

Estado em que as fissuras se apresentam com aberturas $w_k \leq 0,2\text{mm}$. Esta abertura de fissuras se aplica ao caso de pós-tração e classe de agressividade ambiental I ou II.

2.3 Módulo de elasticidade do concreto

Segundo a NBR 6118:2001 - Projeto de estruturas de concreto, a resistência característica mínima a compressão (f_{ck}) para concretos com armadura ativa deve ser 25 MPa.

O módulo de elasticidade inicial do concreto (E_{ci}), que assim passou a ser denominado pela NBR 6118:2001, a rigor está ligado ao valor médio da resistência à compressão do concreto (f_{cm}) [NBR 6118:2001]. Como f_{cm} não é conhecido na fase de projeto, apenas f_{ck} , esta mesma norma admite que E_{ci} seja calculado à partir da resistência característica do concreto aos 28 dias de idade (f_{ck}), utilizando a expressão (1). No desenvolvimento do programa computacional, que integra este trabalho, o módulo de elasticidade inicial do concreto recebeu a notação E_c .

$$E_{ci} = 5600 f_{ck}^{1/2} \quad (f_{ck} \text{ e } E_{ci} \text{ em MPa}) \quad (1)$$

No anexo A.7, a NBR 6118:2001 propõe índices de correção do módulo de elasticidade em função da natureza do agregado graúdo utilizado e da consistência do concreto fresco.

A NBR 6118/1980 - Projeto e execução de obras de concreto armado, determina o módulo de elasticidade do concreto a partir da resistência média à compressão do concreto (f_{cj}), que, no entanto, é estimada a partir do f_k de projeto.

Para a determinação do módulo de elasticidade inicial do concreto (E_{ci}), neste trabalho, foram considerados os critérios da NBR 6118:2001.

Vale ressaltar que, seguindo as orientações da NBR 6118:2001, obtém-se para E_{ci} valores menores (da ordem de 20%) que os obtidos com a NBR 6118/1980.

Este módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) também pode ser usado para relacionar tensões e deformações de tração.

O módulo de elasticidade inicial E_{ci} numa idade $j \geq 7$ dias também pode ser avaliado através da expressão (1), substituindo-se f_{ck} por f_{ckj} .

Nas análises elásticas de projeto, como a verificação dos estados limite de serviço, deve-se utilizar o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) dado pela expressão (2).

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci} \quad (2)$$

Ainda segundo a NBR 6118:2001, para o cálculo das perdas de protensão, permite-se utilizar o módulo de elasticidade inicial do concreto (E_{ci}), fornecido pela expressão (1).

2.4 Curvas limite

As curvas limite fornecem de maneira aproximada a posição limite do cabo de protensão equivalente (ver definição na seção 3.4.2) para que as tensões na seção transversal da viga fiquem numa faixa de valores desejáveis, ou seja, elas determinam uma região na viga dentro da qual deverá estar o cabo equivalente.

Por exemplo, pode-se definir um limite superior para a posição do cabo de protensão equivalente na seção transversal da viga para que a tensão na borda inferior seja nula. Isto quer dizer que, se o cabo de protensão estiver acima deste limite, ocorrerão tensões de tração na borda inferior. Vale observar que esta posição limite do cabo depende da combinação de ações considerada, assim, para combinações de ações distintas encontraremos posições limite distintas. Analogamente, pode-se definir uma posição limite inferior do cabo de protensão na seção transversal, para que a tensão na borda superior seja nula. Ao invés de limitar a tensão nas bordas ao valor zero, poder-se-ia, por exemplo, permitir que ocorresse uma pequena tensão de tração. Pode-se também definir posições limite do cabo de protensão para que nas bordas não ocorram tensões de compressão acima de determinado valor. Cabe aqui novamente observar que as posições limite do cabo dependem da combinação de ações considerada.

Considerando que os momentos fletores variam de seção a seção, repetindo a análise acima em várias seções ao longo da viga, encontra-se para cada seção uma posição limite do cabo. Se forem unidos os pontos correspondentes às posições limite do cabo nas seções consideradas, obtêm-se as chamadas curvas limite (Figura 4).

Para traçar a curva da posição limite superior do cabo de protensão equivalente (Figura 4), pode-se, por exemplo, proceder da seguinte maneira: limitar a tensão na borda inferior a um valor σ_{it} igual a zero ou igual à resistência à tração do concreto, e considerar a força de protensão na seção do

meio do vão ao final da vida útil da estrutura (P_∞), ou seja, a força de protensão após a ocorrência de todas as perdas de protensão (ver expressão (3)).

Considerando que, nas vigas simplesmente apoiadas, no seu trecho central, ao final da vida útil da mesma, com todos os carregamentos atuando, os momentos fletores são maiores e a força de protensão é menor, conclui-se ser esta uma condição de carregamento desfavorável para as tensões na borda inferior

No programa computacional desenvolvido, para traçar a curva da posição limite superior do cabo de protensão equivalente, foi considerada a combinação freqüente de ações. A tensão na borda inferior foi limitada à tensão do estado limite de serviço que deve ser atendido pela combinação freqüente, para o nível de protensão considerado [Loriggio, 1999]. Detalhes dos procedimentos adotados para determinação das curvas limite podem ser vistos no fluxograma da Figura 20.

$$P_\infty (Seção) \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e_{pe}(Seção)}{W_i} \right) + \frac{M_{g1}(Seção)}{W_i} + \frac{M_{g2}(Seção)}{W_i} + \gamma \cdot \frac{M_q(Seção)}{W_i} = \sigma_{it} \Rightarrow e_{pe}(Seção) \quad (3)$$

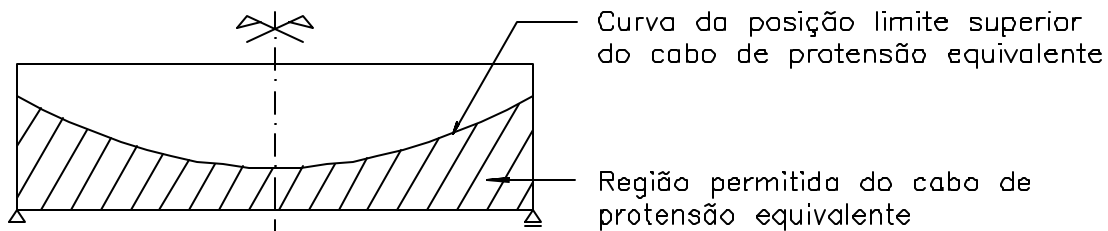


Figura 4 - Posição limite superior do cabo de protensão equivalente

P_0 - Força de protensão no cabo equivalente, numa determinada seção, após a ocorrência de todas as perdas imediatas de protensão

P_∞ - Força de protensão no cabo equivalente, numa determinada seção, após a ocorrência de todas as perdas de protensão (imediatas e progressivas)

- e_{pe} - Excentricidade do cabo de protensão equivalente em relação ao baricentro da seção transversal da viga, numa determinada seção
- A_c - Área da seção transversal da viga
- W_i - Módulo de resistência elástico da seção transversal relativo à borda inferior
- W_s - Módulo de resistência elástico da seção transversal relativo à borda superior
- M_{g1} - Momento fletor na seção considerada devido ao carregamento permanente mobilizado por ocasião da protensão
- M_{g2} - Momento fletor na seção considerada devido ao carregamento permanente aplicado após a protensão
- M_q - Momento fletor na seção considerada devido ao carregamento acidental
- σ_{it} - Tensão admissível na borda inferior da viga
- σ_{st} - Tensão admissível na borda superior da viga
- ψ - Fator de redução de ações variáveis (ψ_1, ψ_2)

Para traçar a curva da posição limite inferior do cabo de protensão equivalente (Figura 5), pode-se por exemplo proceder desta maneira: limitar a tensão na borda superior a um valor σ_{st} igual a zero ou igual à resistência à tração do concreto e considerar a força de protensão na seção do apoio no tempo zero (P_0), ou seja, após a liberação do cabo pelo dispositivo de tração, isto é, antes da ocorrência das perdas progressivas (ver expressão (4)).

Considerando que, nas vigas simplesmente apoiadas, o cabo de protensão equivalente normalmente está junto à face inferior, que, ao final da protensão, a força de protensão é maior e o peso próprio atuante é menor, conclui-se ser esta uma condição de carregamento crítica para as tensões na borda superior.

No aplicativo desenvolvido, para traçar a curva da posição limite inferior, foi considerado o carregamento atuante na fase de protensão. A tensão na borda superior foi limitada à tensão do estado limite de formação de fissuras (σ_{ELS-F}) [Loriggio, 1999]. Detalhes dos procedimentos adotados podem ser vistos também no fluxograma da Figura 20.

$$P_0(Seção) \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e_{pe}(Seção)}{W_s} \right) + \frac{M_{g1}(Seção)}{W_s} = s_{st} \Rightarrow e_{pe}(Seção) \quad (4)$$

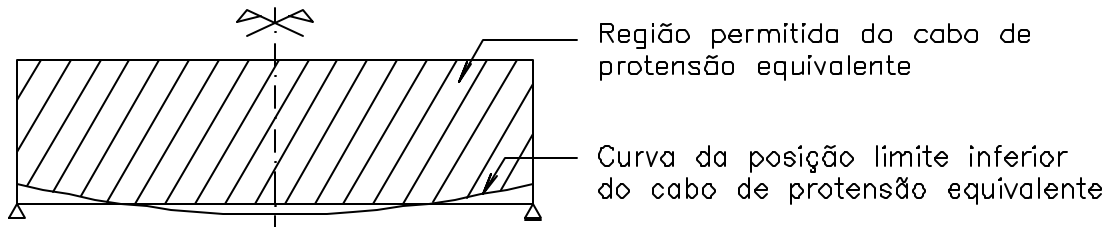


Figura 5 - Posição limite inferior do cabo de protensão equivalente

Da interseção das duas regiões acima determinadas obtém-se uma região desejável de localização do cabo de protensão equivalente, conforme mostra a Figura 6.

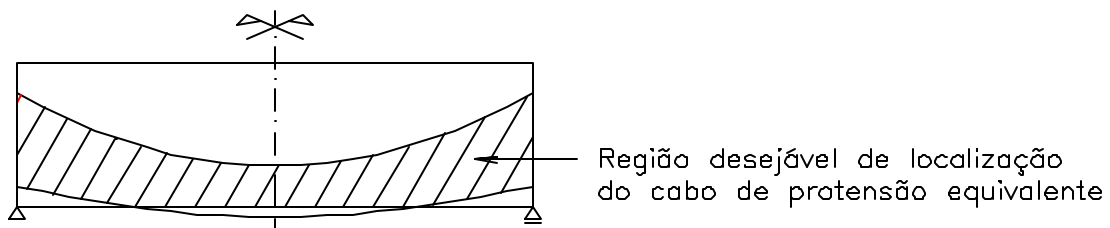


Figura 6 - Região desejável de localização do cabo de protensão equivalente

Dependendo da seção transversal adotada e dos cabos de protensão escolhidos, varia a posição das curvas limite e, conseqüentemente a região desejável de localização do cabo de protensão equivalente. No caso de terem sido escolhidos seção transversal e/ou cabos de protensão inadequados, a região de localização do cabo de protensão equivalente pode assumir formas e/ou posições indesejáveis conforme mostrado na Figura 7.

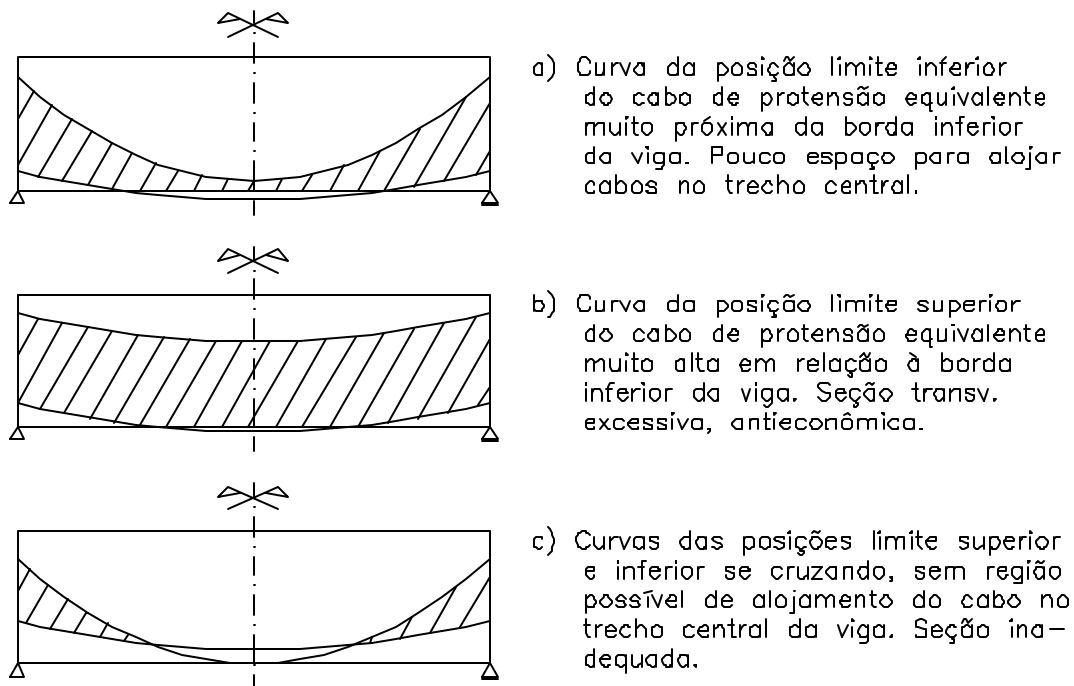


Figura 7 - Formas ou posições indesejáveis da região de localização do cabo de protensão equivalente

As curvas limite determinam, portanto, uma região na viga dentro da qual deverá estar o cabo de protensão equivalente. Os cabos de protensão individuais deverão ser lançados de tal maneira que o cabo equivalente fique dentro da região determinada pelas curvas limite.

Desta forma, pode-se pensar em utilizar as curvas limite para balizar um lançamento automático dos cabos de protensão, pelo programa computacional. Atualmente, o lançamento dos cabos de protensão é feito de forma semi-automática (ver item 3.4).

Nos exemplos apresentados no Capítulo 4, foram observadas as tensões nas bordas das seções das vigas, conforme a posição do cabo equivalente relativamente às curvas limite. Nas conclusões e recomendações do Capítulo 5, comenta-se a utilização das curvas limite, para balizar o lançamento automático de cabos de protensão pel o programa computacional.

2.5 Traçado geométrico dos cabos de protensão

Nos trechos curvos dos cabos, deve-se prever raios de curvatura mínimos, a fim de evitar pressões muito elevadas no concreto e grandes perdas por atrito.

Na Tabela 5, relacionam-se os raios de curvatura mínimos recomendados dos cabos e os raios de curvatura mínimos admissíveis, que poderão ser utilizados em casos especiais.

Tabela 5 - Raios mínimos de curvatura de cabos com bainha corrugada
 [Pfeil,1983]

Cabo	$r_{\text{mín}} \text{ recomendado (m)}$	$r_{\text{mín}} \text{ admissível (m)}$
12 ϕ 5mm	4	3,5
12 ϕ 7mm	5	3,5
12 ϕ 8mm	6	3,5
6 ϕ 12,7mm	6	3,5
12 ϕ 12,7mm	8	5,0
19 ϕ 12,7mm	8	5,0
12 ϕ 15,2mm	8	5,0

Para o traçado dos trechos curvilíneos dos cabos, normalmente, adota-se a parábola do 2º grau por ser uma curva simples, e por ter um raio de curvatura aproximadamente constante para pequenas inclinações do cabo, que resulta em perdas por atrito praticamente proporcionais ao comprimento da curva.

2.6 Perdas de protensão no caso de pós-tração.

Denomina-se perda de protensão a redução no valor da força aplicada ao cabo de protensão. Devido à época de ocorrência dessas perdas, elas são classificadas em perdas imediatas e perdas progressivas.

As perdas imediatas são as que ocorrem na ocasião da protensão. Aqui se enquadram três tipos de perdas: as perdas por atrito entre a armadura e a bainha, as perdas por deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem e as perdas por encurtamento imediato do concreto. As perdas imediatas podem ser medidas ou controladas na obra e a sua avaliação pode ser feita com boa precisão [Pfeil, 1983].

As perdas progressivas processam-se num período de vários anos e dependem das propriedades dos materiais que compõem a estrutura. Aqui se enquadram também três tipos de perdas: as perdas por fluência do concreto (deformação lenta, *creep*), as perdas por retração do concreto (*shrinkage*) e as perdas por relaxação do aço de protensão. Como as perdas progressivas são influenciadas pelas condições ambientais da obra, a sua avaliação não é muito precisa [Pfeil, 1983].

2.6.1 Perdas por atrito

As perdas por atrito no aparelho de tensionamento dos cabos podem ser compensadas por acréscimos na força de protensão no aparelho tensor. Tratare-se-á aqui das perdas por atrito entre o cabo de protensão e a bainha, perdas estas que se desenvolvem ao longo do cabo durante a protensão.

As perdas na força de protensão, por atrito entre a cordoalha e a bainha, dependem da soma dos ângulos de desvio previstos ($\Sigma\alpha$, medidos em radianos) entre a seção de aplicação da força de protensão e a seção considerada. Devem ser considerados também os desvios decorrentes de curvaturas não intencionais do cabo (ondulações) por efeitos construtivos. Estas perdas, tradicionalmente, são calculadas através da expressão (5), e constam praticamente em todas as publicações referenciadas.

$$P_a(x) = P_i \cdot e^{-\mu[\Sigma\alpha + \beta(s_1 + x_2)]} \quad (5)$$

$P_a(x)$ - Força de protensão na seção de abcissa x , após as perdas por atrito

P_i - Força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração

μ - Coeficiente de atrito aparente entre cabo e bainha

$\Sigma\alpha$ - Soma dos ângulos de desvio previstos entre a seção de aplicação da força de protensão e a seção de abcissa x , medido em radianos

β - Deflexão fictícia por unidade de comprimento ao longo do cabo, devido às curvaturas não intencionais do cabo, medido em radianos/m

s_1, x_1, x_2, x - Indicadas na Figura 8

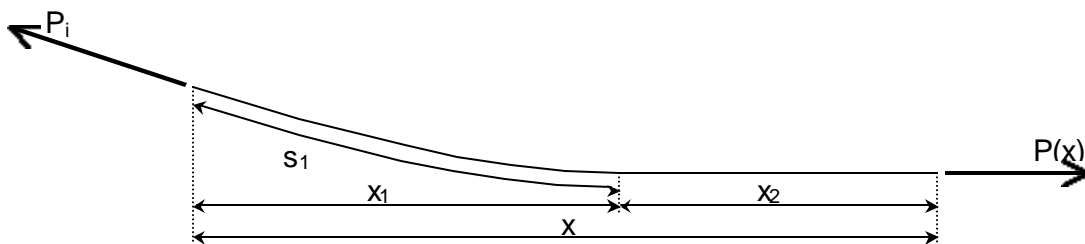


Figura 8 - Perdas por atrito

Nas vigas protendidas usuais, os cabos de protensão possuem pequenas inclinações e pode-se fazer $s_1 \cong x_1$, de formas que $s_1 + x_2 \cong x_1 + x_2 = x$. Segundo a NBR 6118:2001 - Projeto de estruturas de concreto, na falta de dados experimentais, pode ser utilizado $\beta = 0,01$ rad/m. Com estas considerações a expressão (5) passa a ser escrita como indicado na expressão (6).

$$P_a(x) = P_i \cdot e^{-\mu[\Sigma\alpha + 0,01 \cdot x]} \quad (6)$$

No programa computacional desenvolvido, foi utilizada a expressão (7) que é uma linearização da expressão (6).

$$P_a(x) = P_i [1 - m(\sum a + 0,01x)] \quad (7)$$

Detalhes da implementação dos procedimentos acima no aplicativo podem ser vistos no fluxograma da Figura 33.

2.6.2 Perdas por cravação

As perdas por cravação englobam as perdas por deslizamento da armadura na ancoragem e as perdas por acomodação da ancoragem. Estas perdas são consideradas através de um deslocamento δ (recuo) do cabo de protensão na seção de ancoragem. O atrito entre o cabo e a bainha impede que o alívio de tensão que ocorre na seção de ancoragem, estenda-se na mesma intensidade por todo o cabo.

Com relação ao alcance destas perdas ao longo da viga, no caso de protensão simétrica, podem -se distinguir 3 casos possíveis (Figura 9):

- 1° caso: As perdas por cravação limitam-se ao trecho de traçado curvilíneo.
- 2° caso: As perdas por cravação chegam ao trecho de traçado retilíneo.
- 3° caso: As perdas por cravação atingem a seção do meio do vão.

P_0 - Força de protensão no cabo após a ocorrência das perdas imediatas de protensão

O atrito que provoca perda de tensão no cabo quando do tracionamento do cabo impede também, agora agindo no sentido contrário, que a perda de tensão na seção do apoio, devido ao recuo do cabo considerado para as perdas por cravação, ocorra na mesma intensidade nas demais seções ao longo da viga.

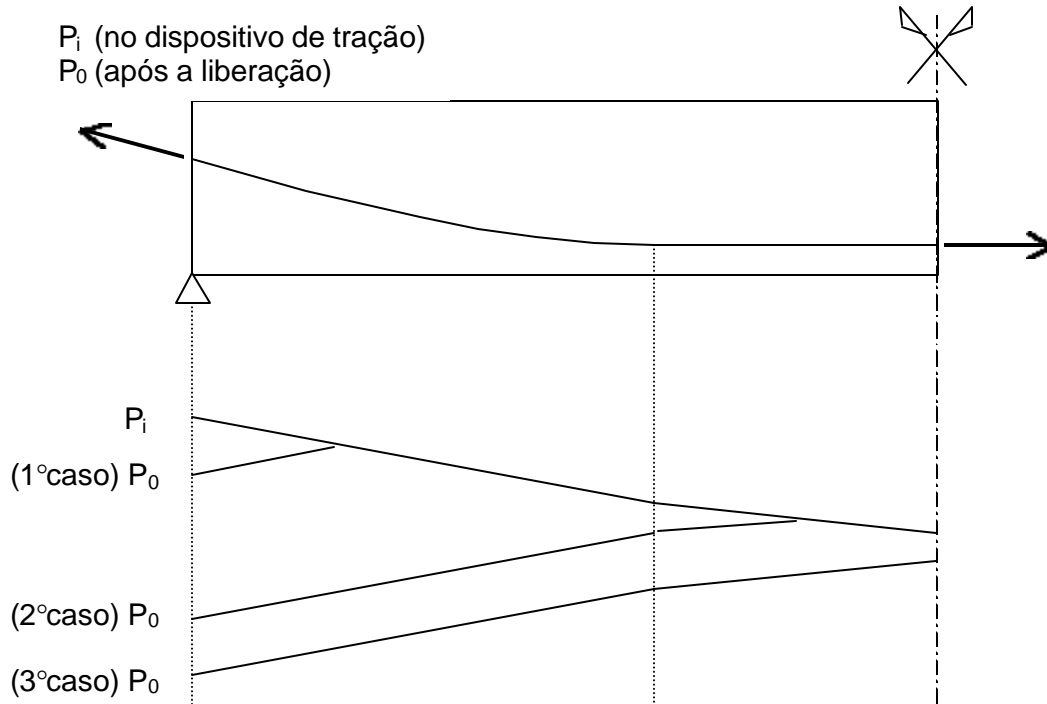


Figura 9 - Perdas por cravação

O comprimento ao longo do qual a força de protensão se modifica em decorrência do deslocamento δ é determinado por uma condição de compatibilidade geométrica: o encurtamento do cabo provocado pela variação na força de protensão é igual ao deslocamento δ (Pfeil, 1983). Desta forma, tendo em vista a Figura 10, pode-se escrever:

$$d = \int_0^x \Delta e_{sp} \cdot dx = \frac{1}{E_{sp}} \int_0^x \Delta s_{sp} \cdot dx = \frac{1}{E_{sp} \cdot A_p} \int_0^x \Delta P_c \cdot dx = \frac{1}{E_{sp} \cdot A_p} (AreaAXA')$$

$$\therefore AreaAXA' = E_{sp} \cdot A_p \cdot d \quad (8)$$

Conhecendo-se o valor de $AreaAXA'$ (expressão (8)) e considerando que $A'X$ é simétrica de AX relativamente à linha horizontal, passando por X , pode-se por tentativas determinar o ponto X (ou A').

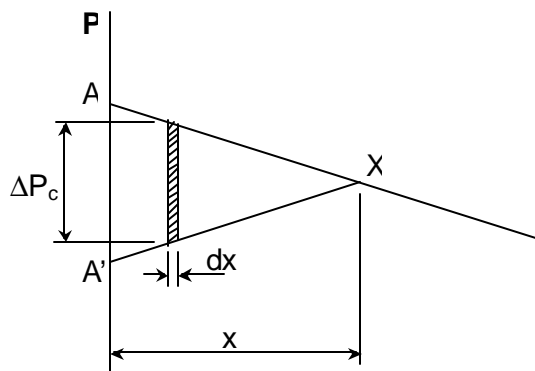


Figura 10 - Diagrama da variação da força de protensão (P) por efeito de um deslocamento δ na extremidade do cabo

- δ - Deslocamento do cabo de protensão por deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem
- $\Delta\varepsilon_{sp}$ - Variação da deformação da unidade de comprimento do cabo
- $\Delta\sigma_{sp}$ - Variação da tensão no cabo (correspondente à $\Delta\varepsilon_{sp}$)
- ΔP_c - Perda na força de protensão devido ao deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem
- E_{sp} - Módulo de elasticidade do aço da armadura ativa
- A_p - Área da seção transversal do cabo de protensão

Detalhes da implementação dos procedimentos acima no programa computacional desenvolvido podem ser vistos nos fluxogramas das Figuras 34 e 35.

2.6.3 Perdas elásticas

As perdas elásticas, denominadas por alguns autores de perdas por encurtamento elástico na fase de protensão, são denominadas pela NBR 6118:2001 de perdas por encurtamento imediato do concreto.

Nas peças pós-tracionadas, no caso de protensão simultânea de todos os cabos, estas perdas são inexistentes. Nas peças pós-tracionadas, a protensão sucessiva de cada um dos n cabos, provoca um afrouxamento dos cabos já protendidos, devido ao encurtamento imediato do concreto.

A perda de tensão média por cabo devido à protensão sucessiva dos n cabos (n_{cab}), pode ser calculada pela expressão (9) [NBR 6118:2001].

$$\Delta s_p = \frac{E_{sp}}{E_c} (s_{cp,p} + s_{cp,g1}) \frac{n_{cab} - 1}{2.n_{cab}} \quad (9)$$

$\Delta\sigma_p$ - Perda de tensão média por cabo de protensão devido ao encurtamento imediato do concreto

E_c - Módulo de elasticidade inicial do concreto calculado na data da protensão

$\sigma_{cp,p}$ - Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão devido à protensão simultânea de todos os cabos (força P_c)

$\sigma_{cp,g1}$ - Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devido à carga permanente mobilizada por ocasião da protensão

n_{cab} - Número de cabos de protensão

Detalhes da implementação dos procedimentos acima no programa computacional podem ser vistos no fluxograma da Figura 36.

2.6.4 Perdas progressivas

As perdas progressivas consideram as perdas na força de protensão devido à retração do concreto, à fluência do concreto e à relaxação da armadura de protensão.

As variáveis que influem no cálculo da retração e da fluência do concreto são a umidade ambiente (U), a consistência do concreto medida através do seu

abatimento (s), a espessura fictícia da peça estrutural (h_{fic}), que é uma medida da velocidade de perda de água do concreto adensado, e que depende da geometria da seção transversal e da idade do concreto na data da protensão (j_{prot}).

A relaxação da armadura de protensão fornecida pelos fabricantes é a medida da perda de tensão de amostras de aço mantidas sob comprimento constante, durante 1000 horas, a 20 °C. Esses valores de perda de tensão, fornecidos através dos coeficientes ψ_{70} e ψ_{80} (por exemplo), são medidas dessa relaxação sob comprimento constante para relações entre a carga inicial e a carga de ruptura do aço (f_{ptk}) iguais a 0,70 e 0,80 respectivamente.

No elemento estrutural, no entanto, a relaxação não ocorre sob comprimento constante e também a fluência do concreto não acontece sob força de protensão constante. Desta forma, a fluência e a relaxação dependem da força de protensão final e do comprimento final da peça que, por sua vez, dependem das perdas por fluência e relaxação.

O cálculo destas perdas é, porém, um processo iterativo convergente e a sua determinação pode ser feita considerando o método proposto pelo Prof. Augusto Carlos de Vasconcelos [Vasconcelos, 1980], através da expressão (10).

$$(\Delta s_{p,c+s+r})_{i+1} = \frac{e_{cs,\infty} \cdot E_{sp} + \frac{E_{sp}}{E_c} j_{\infty} (s_{cp,p0} + s_{cp,g}) - y_{\infty} \left(s_{p0} + \frac{E_{sp}}{E_c} s_{cp,g} + 0,3 \cdot (\Delta s_{p,c+s+r})_i \right)}{1 - \frac{E_{sp}}{E_c} \frac{s_{cp,p0}}{s_{p0}} \left(1 + \frac{j_{\infty}}{2} \right)} \quad (10)$$

Na primeira iteração, pode-se adotar $(\Delta \sigma_{p,c+s+r})_i = \Delta \sigma_{p,c+s}$ (expressão (11)).

$$\Delta s_{p,c+s} = \frac{e_{cs,\infty} \cdot E_{sp} + \frac{E_{sp}}{E_c} j_{\infty} (s_{cp,p0} + s_{cp,g})}{1 - \frac{E_{sp}}{E_c} \frac{s_{cp,p0}}{s_{p0}} \left(1 + \frac{j_{\infty}}{2} \right)} \quad (11)$$

- $\Delta\sigma_{p,c+s}$ - Perda de tensão no cabo de protensão equivalente devido à retração do concreto e à fluência do concreto
- $(\Delta\sigma_{p,c+s+r})_i$ - Perda de tensão no cabo de protensão equivalente devido às perdas progressivas, correspondente à *i*-ésima iteração
- $\varepsilon_{cs,\infty}$ - Valor final da deformação específica por retração do concreto
- φ_{∞} - Valor final do coeficiente de fluência do concreto
- $\sigma_{cp,p0}$ - Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devido à força P_0 .
- $\sigma_{cp,g}$ - Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devido à totalidade da carga permanente (g_1+g_2)
- σ_{p0} - Tensão na armadura ativa devido à força P_0

Maiores detalhes dos procedimentos implementados no programa computacional, para determinação das perdas progressivas podem ser vistos no fluxograma da Figura 37.

A NBR 6118:2001 - Projeto de estruturas de concreto sugere para determinação das perdas progressivas um método não iterativo proposto pelo Prof. José Carlos de Figueiredo Ferraz. Nas conclusões e recomendações, propõe-se implementar também este método no programa computacional para efetuar comparações com os resultados obtidos pelo método do Prof. Augusto Carlos de Vasconcelos.

3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo, é apresentada a estrutura do programa computacional e a dos módulos que o compõe. Cada módulo corresponde a um conjunto de tarefas do projeto da viga. Apresentam-se aqui também os fluxogramas das rotinas que compõem os módulos e os respectivos procedimentos adotados. Os fluxogramas permitem o rápido conhecimento da lógica e da teoria aplicada nas rotinas. Uma breve descrição das telas que correspondem a cada um dos módulos nos quais foi dividido o programa também, é apresentada aqui.

Embora sejam desejáveis implementações computacionais adicionais nos módulos do programa computacional, há que se notar que o aplicativo abrange todo o processo de projeto de uma viga de concreto protendido em condições de serviço. Pela disponibilização aqui neste texto dos fluxogramas e das rotinas implementadas, a facilidade de introdução de melhorias no programa é evidente.

Devido ao tempo restrito para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário limitar a abrangência do programa ao dimensionamento da peça a tensões normais nos Estados Limites de Serviço. O dimensionamento da peça às solicitações normais e tangenciais no Estado Limite Último ficou assim excluído no atual estágio do programa computacional. Para estas verificações podem, no entanto, ser usados os programas computacionais direcionados ao projeto de peças de concreto armado. Resumindo, o programa desenvolvido dimensiona vigas simplesmente apoiadas de concreto protendido, pós-tracionadas, a tensões normais nos Estados Limites de Serviço.

3.1 Estrutura geral do programa computacional

A estrutura do programa computacional desenvolvido segue basicamente a rotina de trabalho do dimensionamento e detalhamento convencional e manual

utilizada no projeto de vigas simplesmente apoiadas de concreto protendido, pós-tracionadas. Esta é também a seqüência que se encontra nos livros tradicionais sobre o assunto como Pfeil [Pfeil, 1988], [Pfeil, 1983], Leonhardt [Leonhardt, 1983], etc.

Admitir-se-á que o elemento estrutural tenha comportamento linear [La Rovere, 2001], assim admite-se que:

- A mudança de configuração da estrutura deformada é desprezível.
- Existe linearidade na relação deformação específica - deslocamento.
- O material é elástico - linear (segue a Lei de Hooke).

A protensão será considerada como uma força normal aplicada na seção transversal, no ponto de passagem do cabo, que é a maneira mais conveniente de se tratar a protensão no dimensionamento e detalhamento de peças isostáticas em condições de serviço (ver item 2.1).

As rotinas desenvolvidas foram dispostas em módulos e organizadas conforme descrito a seguir.

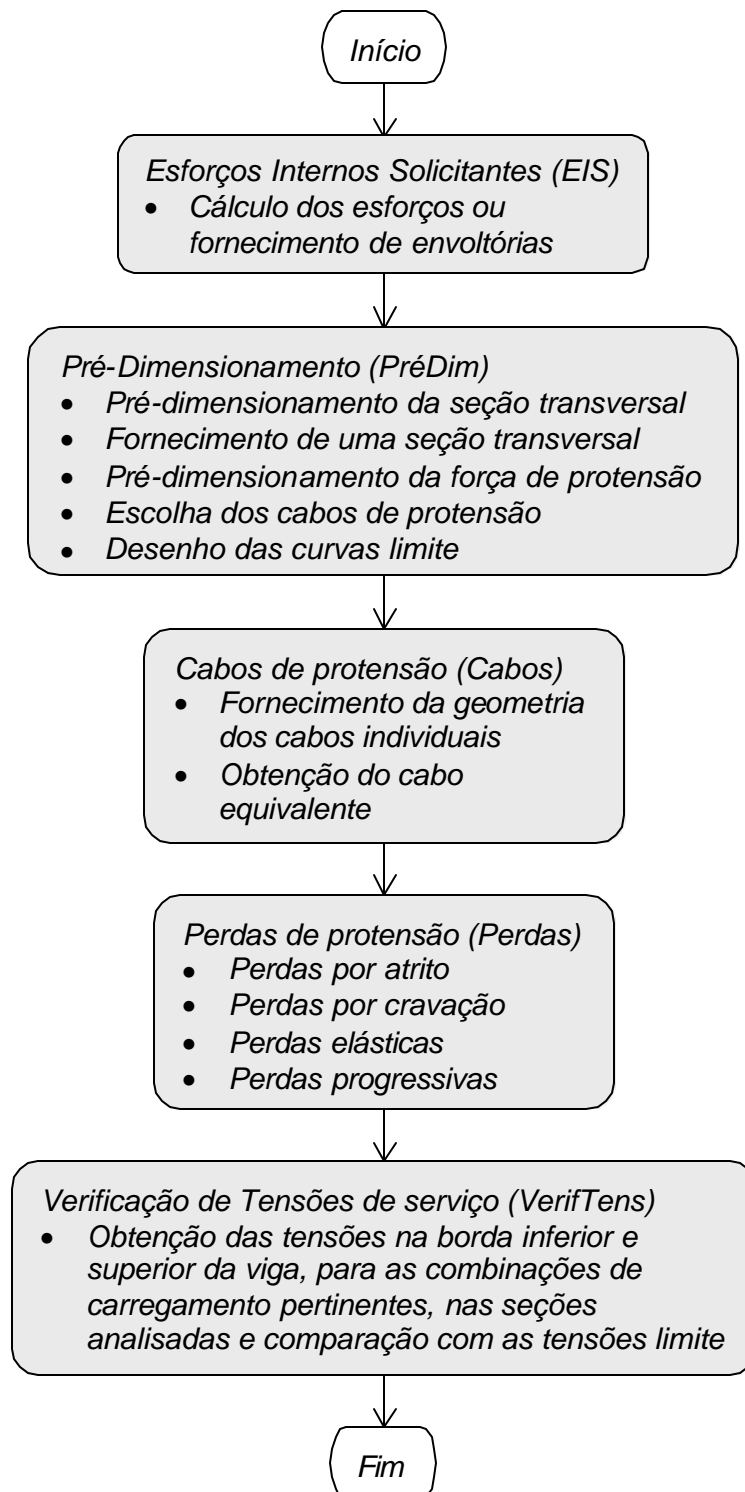
- Inicialmente são determinados os Esforços Internos Solicitantes (EIS). Estes poderão ser calculados a partir dos carregamentos ou também poderão ser fornecidas as envoltórias de esforços para os diversos casos de carregamento. Neste módulo EIS, também será fornecido o número de seções da viga a serem consideradas na análise, ou seja, as seções em que devem ser calculados os esforços internos solicitantes, as perdas na força de protensão e as tensões.
- No módulo de Pré-Dimensionamento (PréDim), calcular-se-á inicialmente o módulo de resistência mínimo que deve ter a seção transversal. Na seqüência, deverá ser escolhida uma seção transversal entre as disponibilizadas pelo programa ou então ser fornecida uma nova seção transversal. No módulo PréDim, também será calculada a força de protensão necessária na seção do meio do vão, baseada na limitação da tensão de tração na borda inferior. De uma relação de cabos de protensão de utilização usual, o programa escolherá os cabos de protensão de menor

seção transversal que atendem a força de protensão determinada. Ainda neste módulo, serão desenhadas as curvas limite dentro das quais deverá estar o cabo de protensão equivalente.

- No módulo Cabos, serão lançados os cabos de protensão. Aqui será fornecida a geometria dos cabos individuais para então ser obtido o cabo equivalente, que é um cabo único equivalente à totalidade dos cabos individuais. Este cabo equivalente deverá estar dentro do espaço delimitado pelas curvas limite obtidas na etapa anterior. Da atual etapa, sairão a excentricidade do cabo de protensão equivalente e a variação na inclinação do cabo equivalente relativamente à seção da ancoragem do cabo. Estas informações serão necessárias para a determinação das perdas de protensão.
- No módulo Perdas, serão calculadas as perdas na força de protensão por atrito entre a bainha e o cabo, as perdas por deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem (perdas por cravação), as perdas por encurtamento elástico do concreto na fase de protensão (perdas elásticas) e as perdas progressivas. Estas perdas serão calculadas nas seções determinadas no 1º módulo (EIS).
- No último módulo, o de Verificação de Tensões (VerifTens), serão calculadas nas seções consideradas as tensões na borda superior e inferior da viga para as combinações de ações correspondentes ao nível de protensão desejado. Estas tensões serão comparadas com as tensões limite das respectivas combinações de ações.

Os dados necessários ao processamento computacional são escolhidos de tabelas embutidas no programa ou solicitados pelo programa ao usuário à medida que se fazem necessários nos diversos módulos descritos acima. Resultados intermediários são mostrados ao longo das diversas etapas, sendo permitido ao usuário interagir com o programa, ou seja, conforme os resultados obtidos, o usuário poderá avançar ou retornar no programa, modificar dados anteriormente fornecidos, reprocessar etapas e assim por diante.

O fluxograma da Figura 11 sintetiza as tarefas de projeto executadas em cada um dos 5 módulos do programa computacional.



Obs.: A entrada de dados e saída de resultados ocorre em todos os blocos.

Figura 11 - Fluxograma geral do programa

3.2 Esforços internos solicitantes

Neste módulo inicial (EIS), serão determinadas as seções a serem consideradas na análise da viga e, a seguir, serão calculados os esforços internos solicitantes nestas seções.

No atual estágio, o programa calcula os momentos fletores nas seções consideradas para cargas uniformemente distribuídas em todo o vão. Se houver necessidade de fornecer diagramas de momento para outros tipos de carregamentos, é possível informar os valores dos diagramas diretamente por arquivos de texto, através da caixa de lista de arquivos, acima do botão de comando Avançar da Figura 12.

3.2.1 Tela EIS

A Figura 12 mostra a tela EIS que é a tela inicial do aplicativo.

Fornecendo-se o comprimento da viga e o número de seções (n° trechos + 1) a serem consideradas na análise da viga, o programa calculará as abcissas das diversas seções. O número máximo de seções considerado pelo programa é 50 (cinquenta). É nestas seções que serão calculados os esforços internos solicitantes, a força de protensão já descontadas as perdas de protensão, e as tensões nas bordas da viga.

Informando-se os carregamentos, poderão ser calculados os esforços internos solicitantes que serão simultaneamente listados e plotados.

Na tela EIS, também deverá ser fornecido o nível de protensão desejado para a viga e os fatores de redução das ações variáveis.

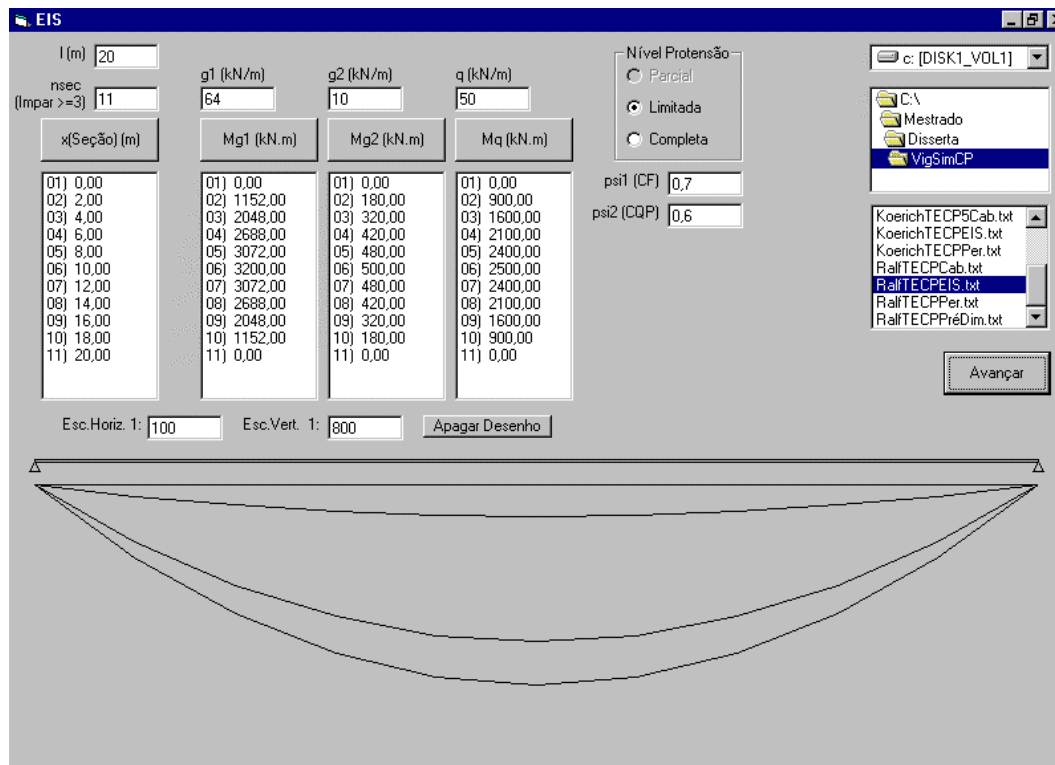


Figura 12 - Tela EIS

3.2.2 Fluxogramas

O fluxograma das principais rotinas computacionais do módulo EIS é apresentado na Figura 13. O significado das notações utilizadas nos fluxogramas está na Lista das Principais Notações, na parte inicial deste texto. Detalhes das rotinas do programa podem ser vistos nos Anexos, na parte final deste texto.

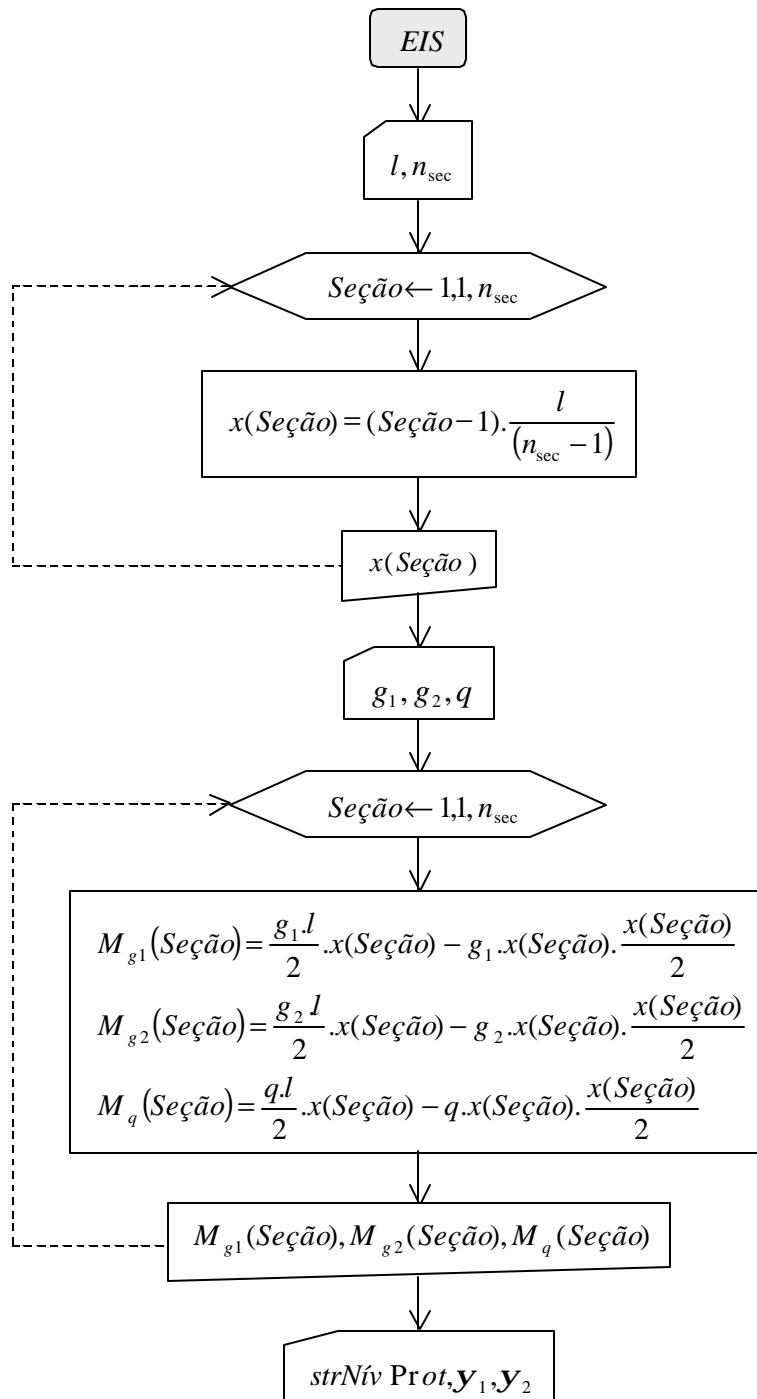


Figura 13 - Fluxograma do módulo EIS

3.3 Pré-dimensionamento

No módulo anterior (EIS), foram determinados os esforços internos solicitantes, neste módulo (PréDim), será fornecida uma seção transversal e o programa escolherá os cabos de protensão.

3.3.1 Pré-dimensionamento da seção transversal

A indicação do tipo de seção transversal ficará a cargo do engenheiro, considerando que existem muitos tipos de seções e também que a seção adequada depende da obra em questão.

As barras consideradas neste programa são prismáticas, de seção transversal, com pelo menos um eixo de simetria, que deve estar na direção vertical.

Com base na variação dos momentos atuantes na seção transversal do meio do vão (ΔM) e na variação de tensões admissíveis para cada borda ($\Delta \sigma$), serão determinados os módulos de resistência mínimos que deve ter a seção transversal ($W_{i,min}$, $W_{s,min}$), ver expressões (12).

$$\begin{aligned} |W_{i,min}| &= \frac{\Delta M}{\Delta \sigma_i} = \frac{M_{g2} + y.M_q}{\Delta \sigma_i} \\ |W_{s,min}| &= \frac{\Delta M}{\Delta \sigma_s} = \frac{M_{g2} + y.M_q}{\Delta \sigma_s} \end{aligned} \quad (12)$$

A variação de tensões admissível numa determinada borda depende do nível de protensão e da combinação de ações considerada, como pode ser visto detalhadamente no fluxograma da Figura 17.

3.3.2 Tela PrédDim e tela PrédDimCab

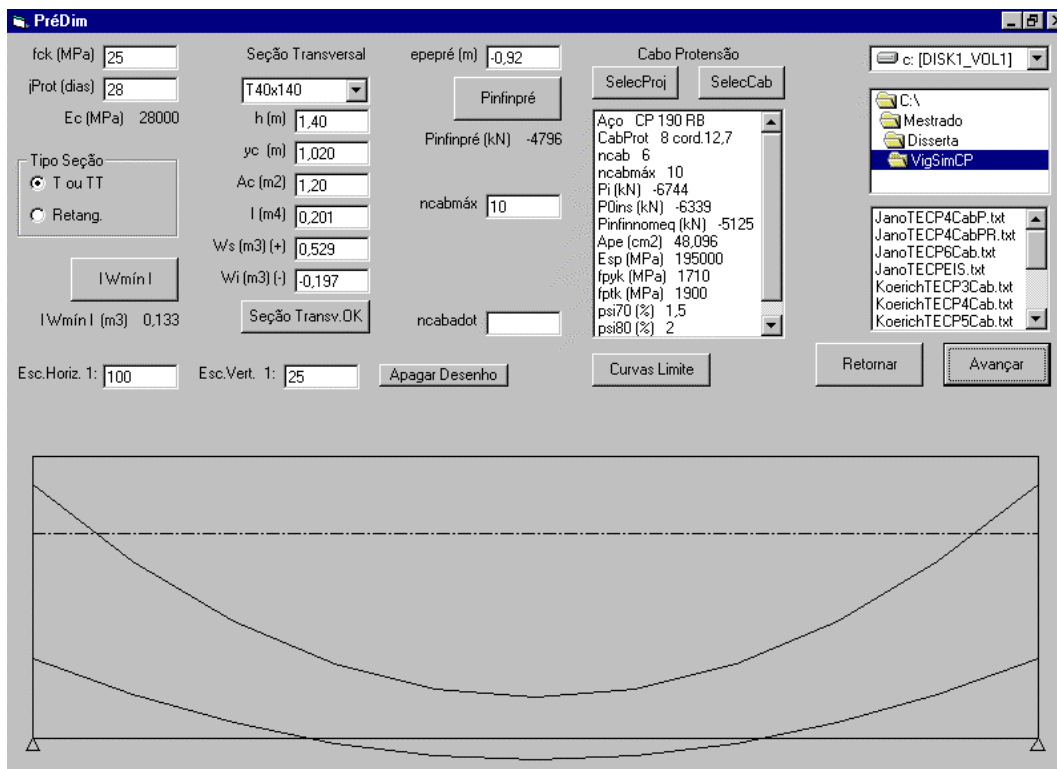


Figura 14 - Tela PrédDim

Na tela PrédDim (Figura 14), ao ser fornecida a resistência característica do concreto e a data da protensão, é determinado o módulo de elasticidade do concreto.

Fornecendo-se o tipo de seção transversal a ser adotado no projeto da viga, pode ser determinado o módulo de resistência mínimo que deve ter a seção transversal. Escolhe-se, então, uma seção transversal entre as disponibilizadas pelo programa, ou então, introduz-se uma nova seção, fornecendo os dados geométricos solicitados.

Informando-se a excentricidade do cabo de protensão equivalente na seção do meio do vão (excentricidade positiva acima do eixo baricêntrico), baseado na limitação da tensão de tração na borda inferior e considerando todos os

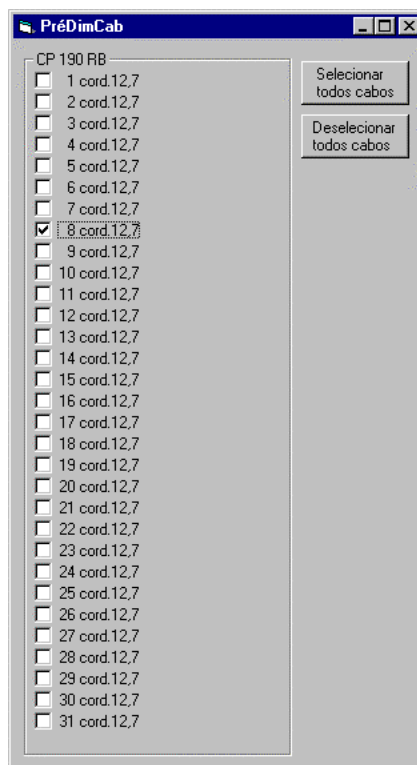


Figura 15 - Tela PréDimCab

carregamentos agindo, é determinada a força de protensão necessária na seção do meio do vão. Esta força de protensão no meio do vão no tempo infinito é usada para escolher os cabos de protensão a serem utilizados. É escolhida a menor seção transversal de aço que atende a força de protensão determinada. Este pré-dimensionamento dos cabos de protensão se baseia numa estimativa de 24% [Pfeil, 1983] para a totalidade das perdas de protensão (tempo infinito) na seção do meio do vão. As características dos cabos de protensão selecionados são listados na tela PréDim (Figura 14). Detalhes dos procedimentos para o pré-dimensionamento dos cabos de protensão podem ser vistos nos fluxogramas das Figuras 18, 19 e 20.

Caso se deseje alterar a quantidade de cabos de protensão a serem utilizados, basta informar, na tela PréDim, o número de cabos a serem adotados. O programa considera sempre o tipo de cabo da última seleção efetuada.

Se for conveniente utilizar apenas um ou alguns tipos de cabo de protensão no projeto da viga, pode-se marcar ou desmarcar os cabos que forem convenientes na tela PréDimCab (Figura 15). A tela PréDimCab é chamada acionando o botão de comando SelecProj da tela PréDim (Figura 14).

Definidos os cabos de protensão a serem utilizados, podem ser desenhadas as curvas limite. Para a determinação da curva da posição limite inferior do cabo de protensão equivalente considerou-se a força de protensão após a ocorrência das perdas imediatas de protensão que foram estimadas em 6% [Pfeil, 1983]. Para a determinação da curva da posição limite superior do cabo de protensão equivalente considerou-se a força de protensão após a ocorrência da totalidade das perdas de protensão (imediatas e progressivas) que foram estimadas em 24% [Pfeil, 1983].

3.3.3 Fluxogramas

Os fluxogramas das principais rotinas do módulo PréDim encontram-se neste item. Inicialmente, na Figura 16, encontra-se o fluxograma geral do módulo. Nas Figuras 17 a 21, encontram-se os fluxogramas que compõem este fluxograma geral.

A Figura 17 mostra o fluxograma da rotina que determina o módulo de resistência mínimo que deve ter a seção transversal da viga, para que a variação de tensões numa determinada borda, decorrente da ação ou não das cargas variáveis (g_2 e q), seja compatível com a máxima variação de tensões admissível para aquela borda.

Na Figura 18, apresenta-se o fluxograma para determinação da força de protensão no tempo infinito, na seção do meio do vão, para que a tensão na borda inferior, atenda às prescrições de tensões correspondentes às

combinações de ações e seus respectivos estados limite de serviço, do nível de protensão desejado.

Nas Figuras 19 e 20, apresentam-se os fluxogramas para escolha dos cabos de protensão de menor seção transversal que atendam à força de protensão no tempo infinito na seção do meio do vão.

Na Figura 21, encontra-se o fluxograma da rotina que determina as curvas limite para atender os estados limite de serviço de descompressão ou de fissuração nas bordas inferior e superior da viga.

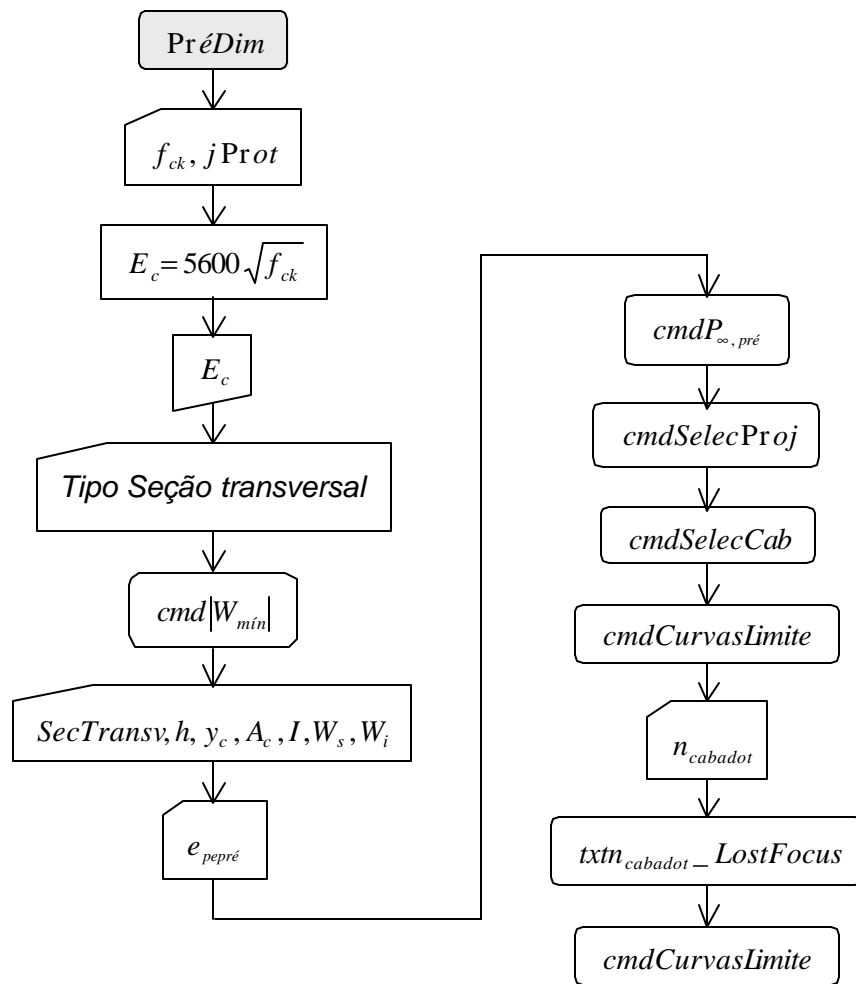


Figura 16 - Fluxograma geral do módulo PréDim

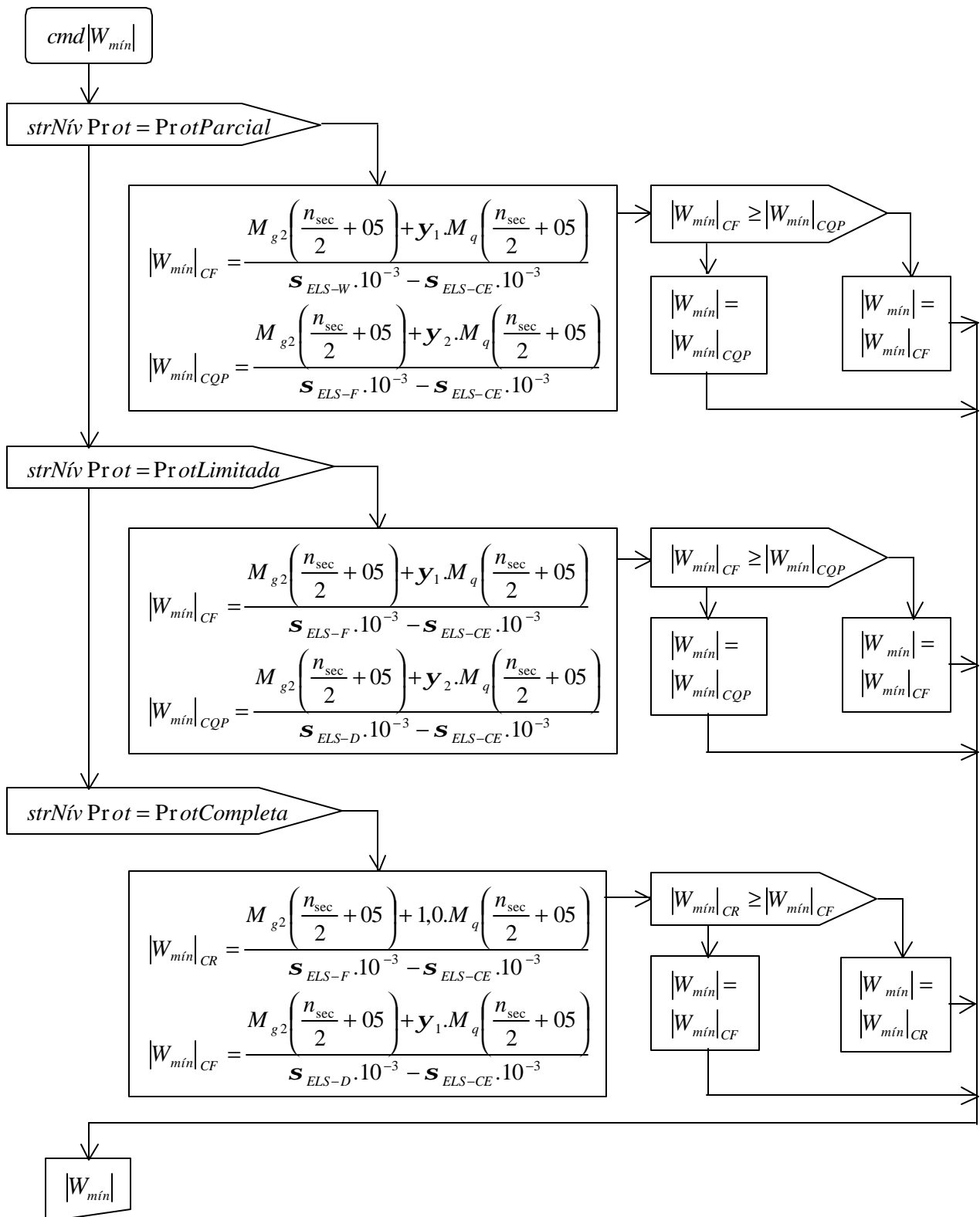


Figura 17 - Fluxograma para o módulo de resistência mínimo da seção transversal

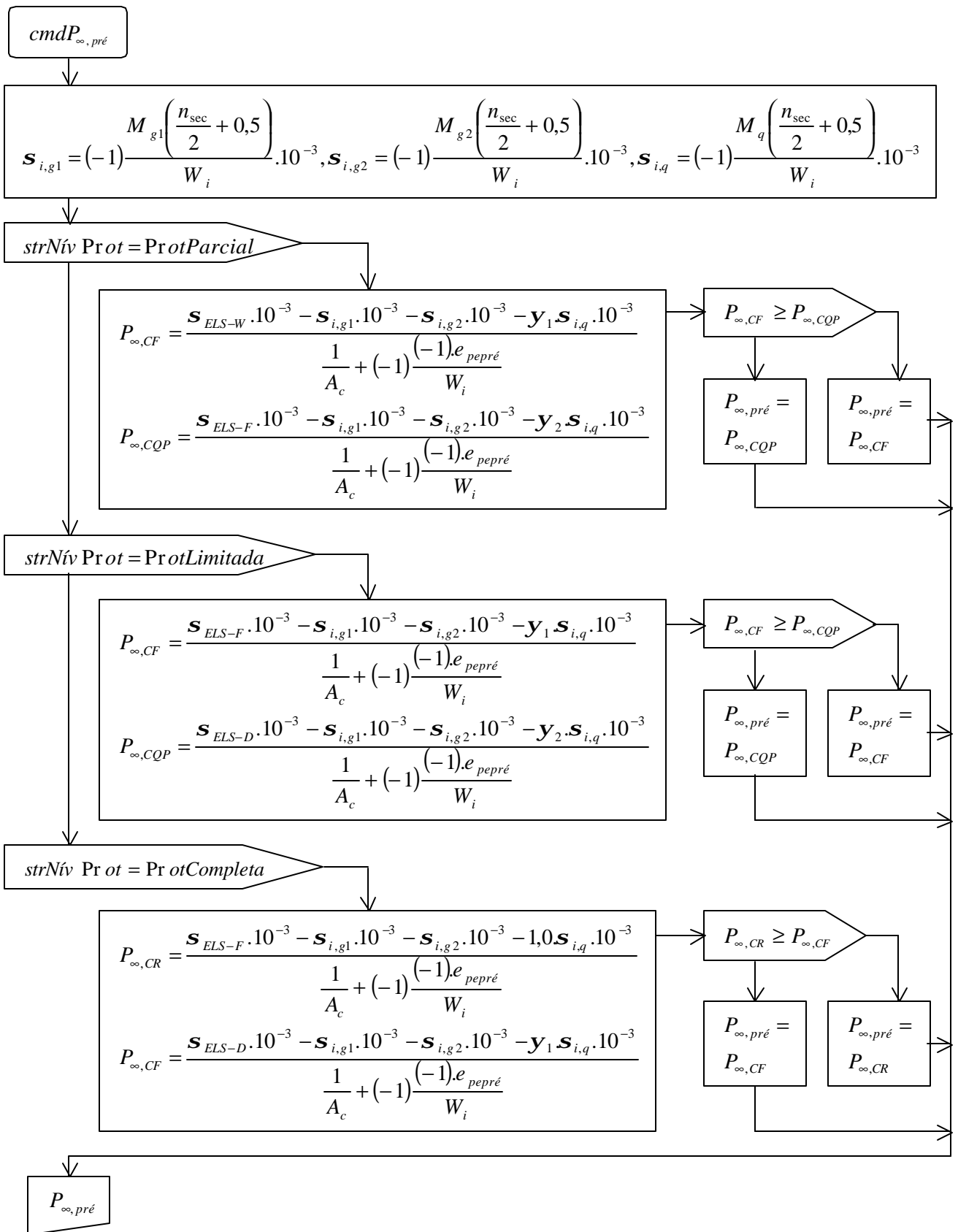


Figura 18 - Fluxograma para pré-dimensionamento da força de protensão

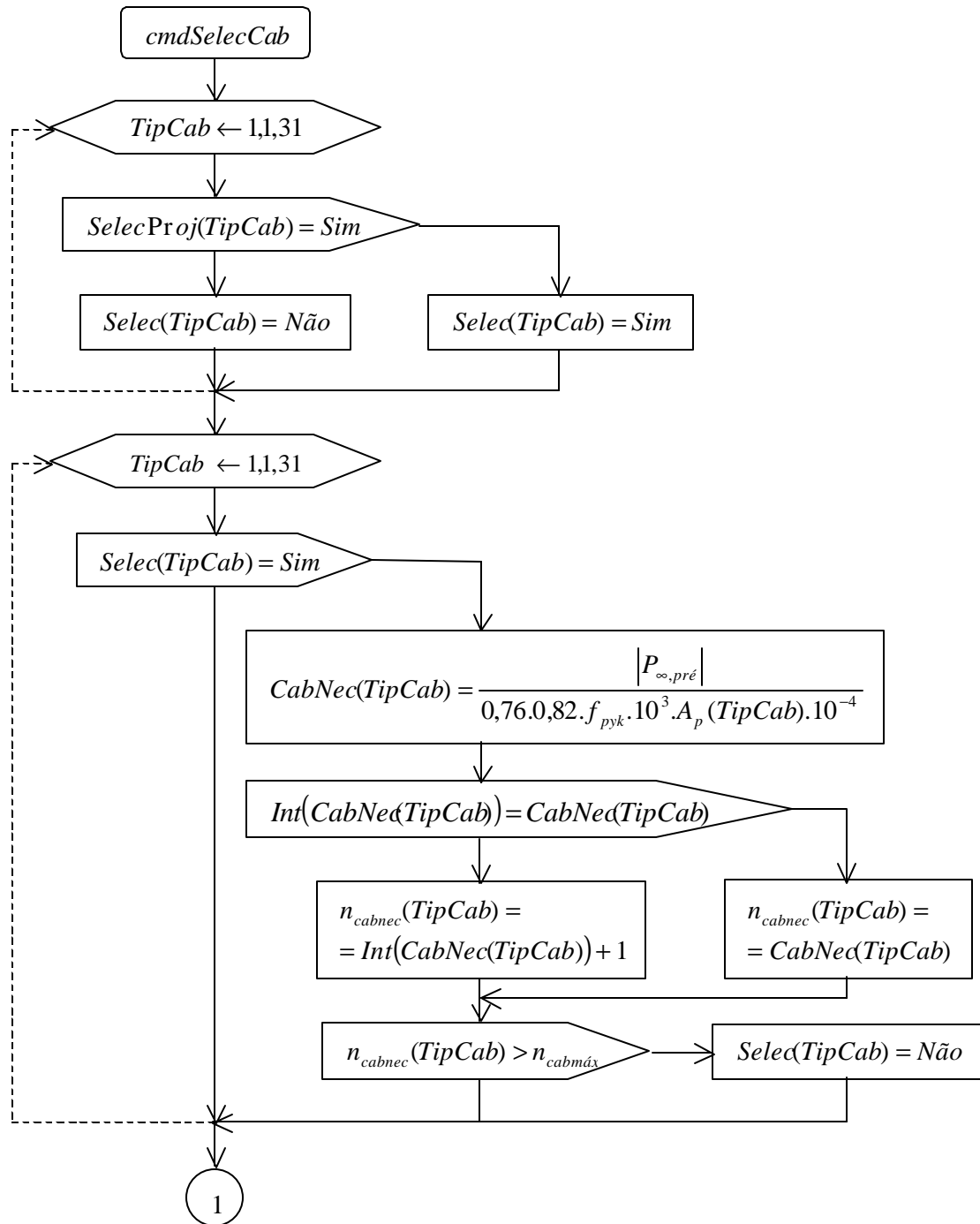


Figura 19 - Fluxograma 1 para escolha do cabo de protensão de menor seção transversal

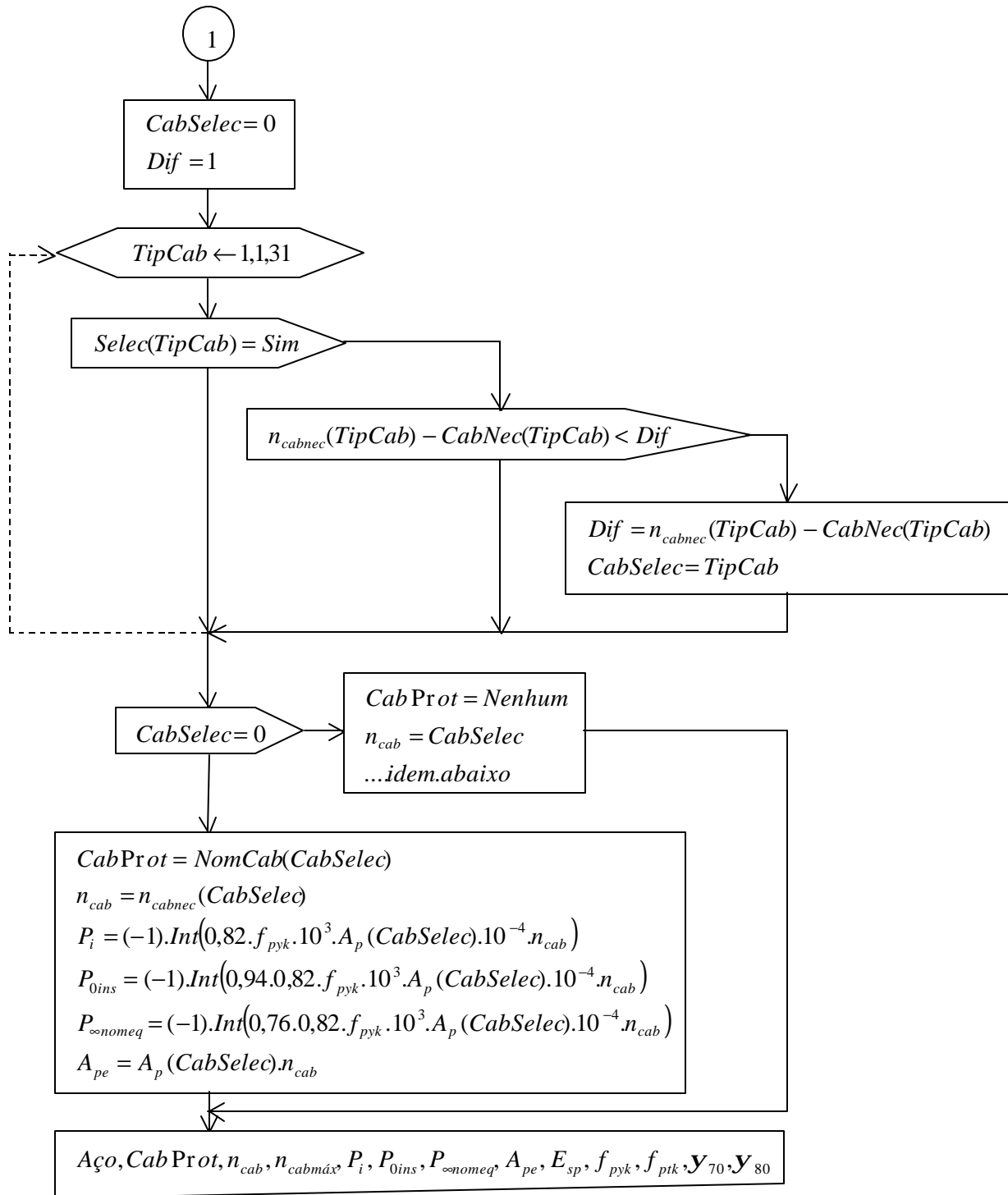


Figura 20 - Fluxograma 2 para escolha do cabo de protensão de menor seção transversal

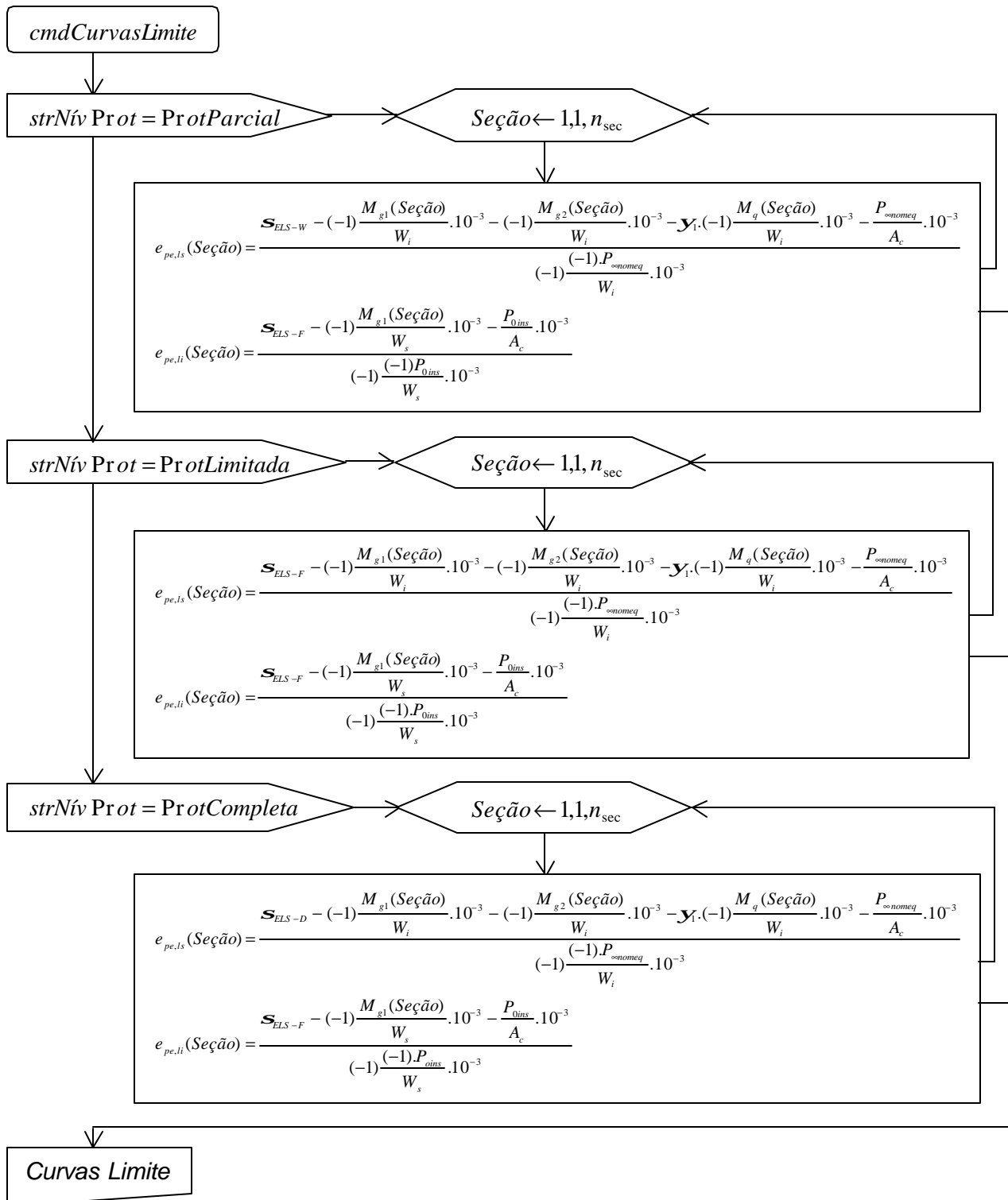


Figura 21 - Fluxograma para traçar as curvas limite

3.4 Cabos de protensão

O tipo de cabo e a quantidade de cabos de protensão a serem utilizados na viga foram determinados no módulo anterior (PréDim). Neste módulo (Cabos), tratar-se-á do traçado geométrico dos cabos individuais e da obtenção do cabo equivalente (ver item 3.4.2).

3.4.1 Traçado geométrico dos cabos

Os cabos de protensão terão traçado curvilíneo e/ou retilíneo, deverão apresentar simetria relativamente ao meio do vão e terão ancoragens ativas em ambas as extremidades da viga. Estas restrições geométricas previstas no atual estágio do programa são, no entanto, usuais em vigas simplesmente apoiadas como pode ser visto na Figura 22. Nesta figura, também se pode observar cabos de traçado retilíneo (1) (difícil executar na prática), cabos de traçado parabólico (4) e cabos de traçado parabólico-retilíneo (2). Com relação às ancoragens, pode-se ter ancoragens ativas na face extrema da viga (3) ou na face superior da viga (5). O aplicativo no atual estágio prevê ancoragens ativas na face extrema da viga.

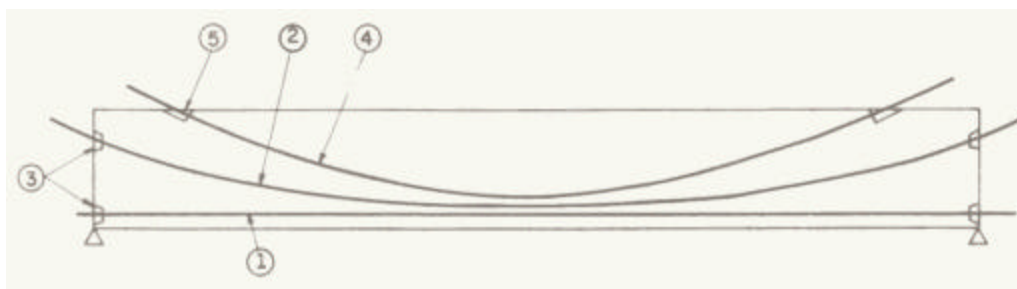


Figura 22 - Cabos de protensão usuais em vigas simplesmente apoiadas

[Pfeil, 1988]

3.4.2 Cabo equivalente

O cabo equivalente é um cabo único que representa todos os cabos de protensão individuais presentes na viga. O seu traçado geométrico, na maioria dos casos, não será composto de trechos parabólicos e/ou retilíneos como o são os cabos individuais que ele representa. As perdas de protensão bem como a verificação final de tensões na viga será feita utilizando-se o cabo de protensão equivalente.

Todos os cabos de protensão individuais deverão ser do mesmo tipo, ou seja, mesma seção transversal e mesmo aço.

O cabo equivalente tem área da seção transversal igual à soma das áreas dos cabos individuais e estará localizado no baricentro dos cabos individuais. Calculado o baricentro do cabo equivalente nas seções em análise, o mesmo poderá ser desenhado. A inclinação do cabo equivalente numa determinada seção é obtida pela média aritmética da inclinação dos cabos individuais nesta mesma seção.

3.4.3 Cordoalhas para protensão

A relaxação das cordoalhas para protensão é a medida da perda de tensão de amostras mantidas sob comprimento constante, durante determinado tempo e a uma certa temperatura. Com relação à relaxação, existem as cordoalhas de relaxação normal (RN) e as cordoalhas de relaxação baixa (RB). As cordoalhas de relaxação normal são aliviadas de tensões internas. As cordoalhas de relaxação baixa são tracionadas e simultaneamente submetidas a uma temperatura de 400 °C na fase final de fabricação, o que resulta num aço cujas perdas de tensão são praticamente inexistentes, após determinado tempo.

No Brasil, as cordoalhas para protensão são fabricadas pela Belgo Bekaert Arames S.A., que atualmente produz somente o tipo de cordoalha CP190RB,

de resistência característica de ruptura à tração $f_{ptk} = 1900$ MPa. As cordoalhas RN deixaram de ser fabricadas na década de 1970 e a classe de resistência $f_{ptk} = 1750$ MPa deixou de ser fabricada na década de 1980 [Fujii, 2002].

Segundo a NBR 7483/1990, a relaxação máxima das cordoalhas de 7 fios de relaxação baixa, após 1000 h, a 20 °C, para a carga inicial de 70% e 80% de f_{ptk} é 2,5% e 3,5% respectivamente. Os valores reais da relaxação das cordoalhas de 7 fios de relaxação baixa (RB) da Belgo Bekaert, após 1000 h, a 20 °C, segundo Issao Fujii [Fujii, 2002], são:

- 0,8% a 1,5% para 70% de f_{ptk} (ψ_{70})
- 1% a 2% para 80% de f_{ptk} (ψ_{80})

No programa computacional, foram implementados cabos de protensão formados por 1 a 31 cordoalhas de 7 fios de 12,7mm CP190RB (Figura 15). Foram considerados para relaxação das cordoalhas os valores $\psi_{70} = 1,5\%$ e $\psi_{80} = 2\%$, e para o módulo de elasticidade o valor $E_{sp} = 195000$ MPa. Mais informações sobre os cabos de protensão implementados no programa podem ser vistos no código do Anexo 6.2.

3.4.4 Tela Cabos

O traçado das curvas limite e a posição do baricentro da seção transversal da viga poderão ser reproduzidos na tela Cabos (Figura 25), para auxiliar no lançamento dos cabos de protensão.

Para o lançamento dos cabos individuais deverá ser fornecido o número total de cabos, determinado no módulo PrédDim, e, para cada cabo, o número do cabo e suas respectivas condições de contorno geométricas conforme indicado na Figura 23, sendo então calculados os parâmetros das curvas dos cabos. Poderá, então, ser desenhado o cabo, calculada a sua excentricidade em

relação ao eixo baricêntrico da viga e a variação na inclinação do cabo relativamente à seção de ancoragem, para todas as seções analisadas.

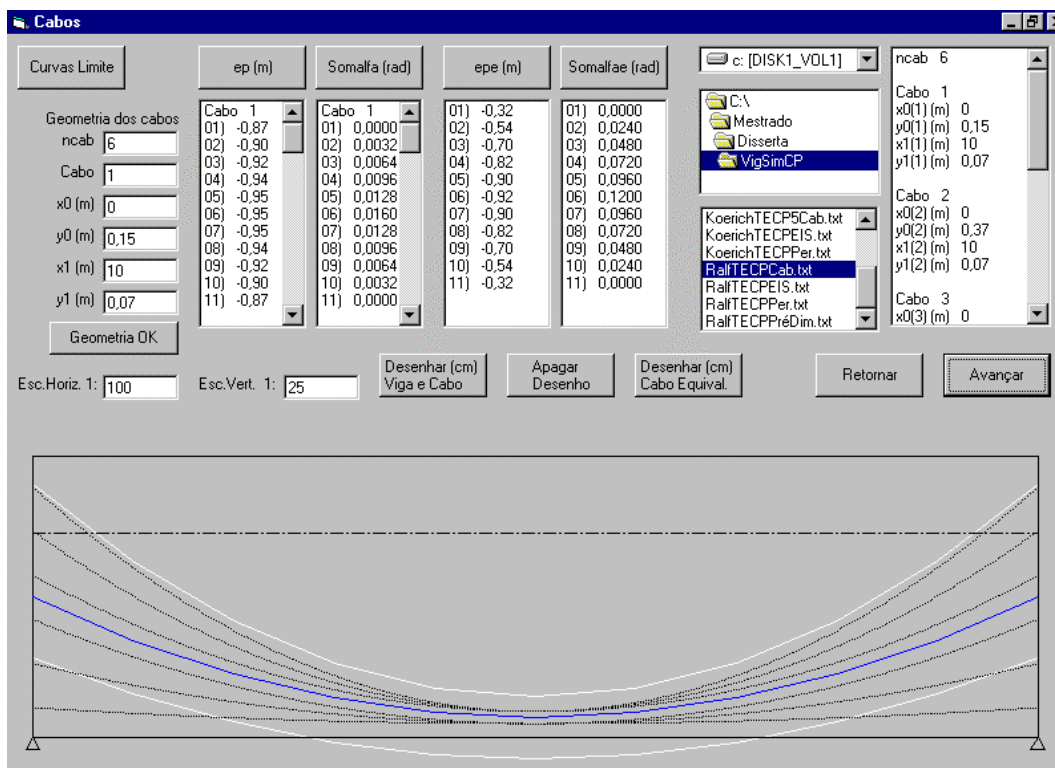


Figura 25 - Tela Cabos

Fornecida a geometria de todos os cabos individuais poderá ser obtido o cabo equivalente, seu desenho e a listagem de suas características de geometria.

3.4.5 Fluxogramas

Os fluxogramas das principais rotinas do módulo Cabos encontram-se neste item. Na Figura 26, encontra-se o fluxograma geral deste módulo e nas Figuras 27 a 31, os fluxogramas que compõem este fluxograma geral.

A Figura 27 mostra o fluxograma da rotina que calcula os parâmetros das curvas que definem o traçado geométrico dos cabos de protensão.

Na Figura 28, apresenta-se o fluxograma da rotina que calcula as excentricidades dos cabos de protensão individuais nas seções analisadas.

Na Figura 29, apresenta-se o fluxograma da rotina que determina a soma dos ângulos de desvio previstos para cada cabo de protensão, entre a seção de aplicação da força de protensão e a seção considerada.

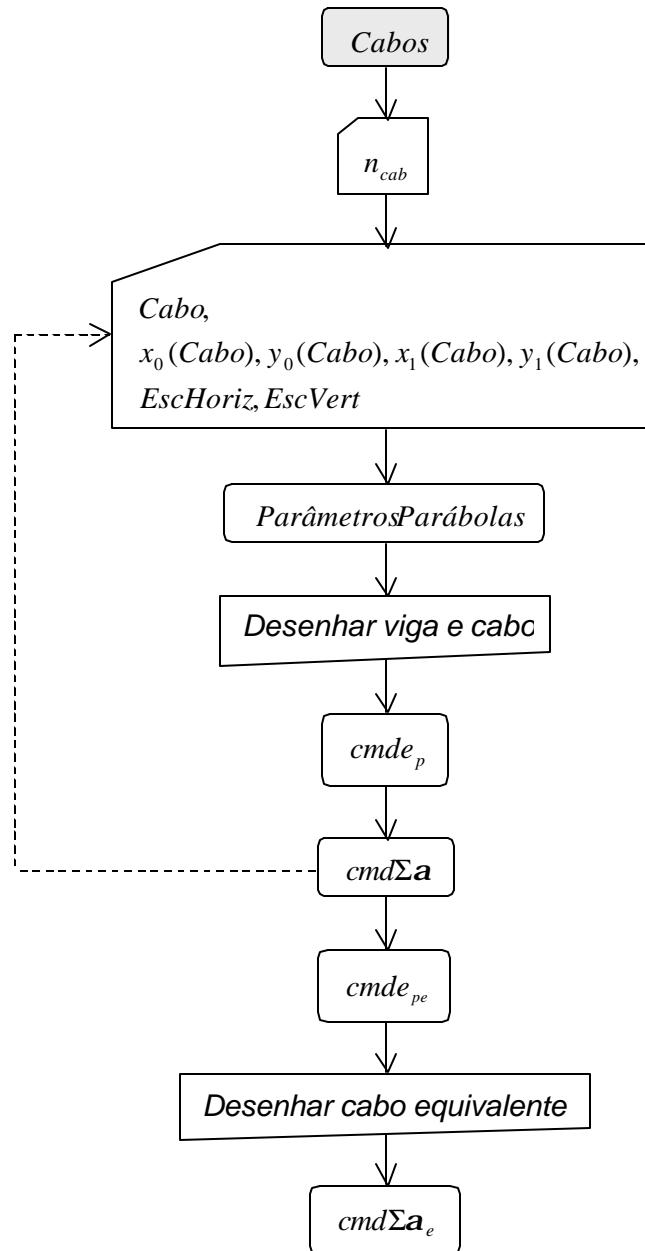


Figura 26 - Fluxograma geral do módulo Cabos

Na Figura 30, é apresentado o fluxograma da rotina que calcula as excentricidades do cabo de protensão equivalente nas seções analisadas.

Na Figura 31, é apresentado o fluxograma da rotina que determina a soma dos ângulos de desvio previstos para o cabo de protensão equivalente, entre a seção de aplicação da força de protensão e a seção considerada.

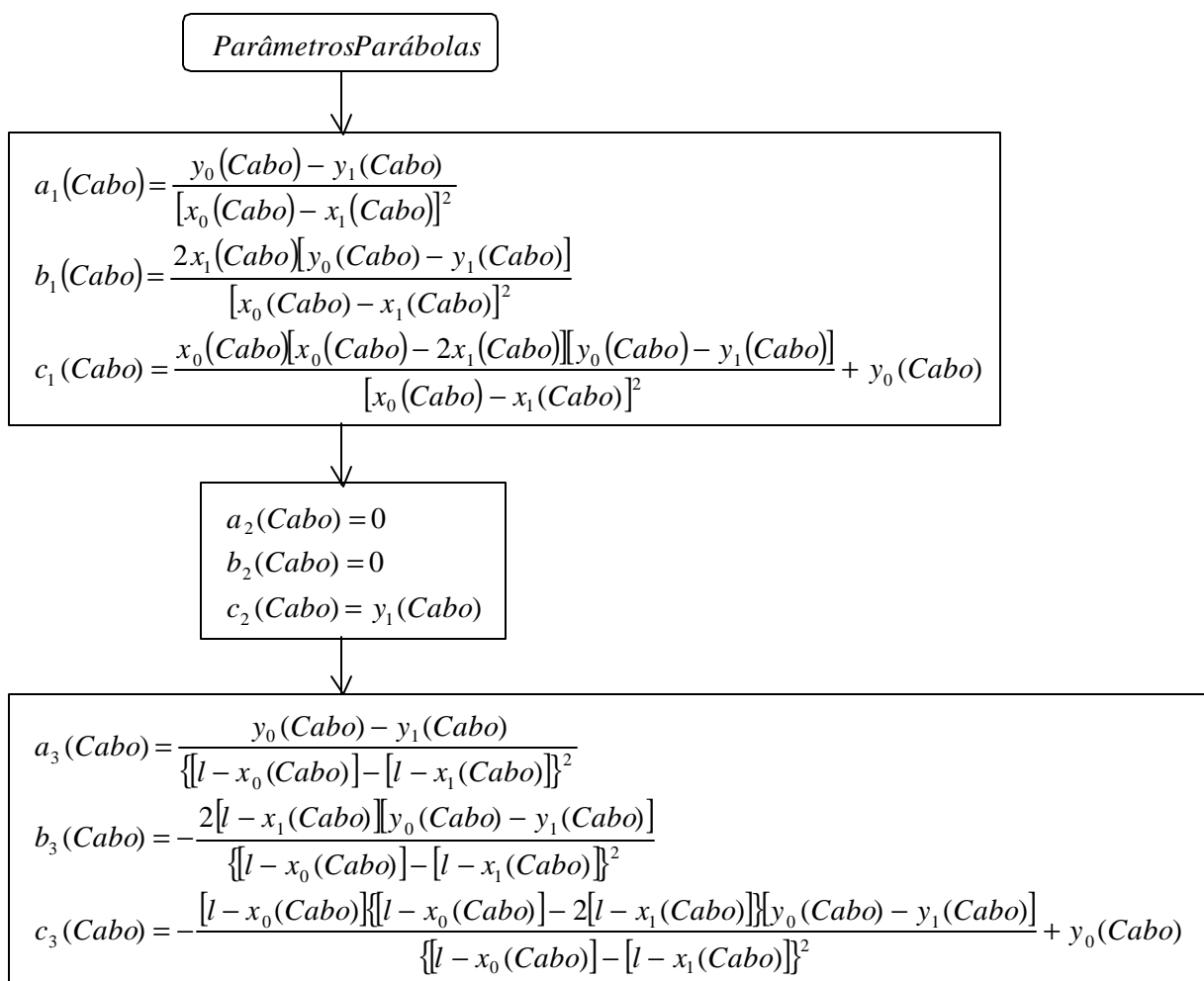


Figura 27 - Fluxograma para os parâmetros das curvas dos cabos de protensão

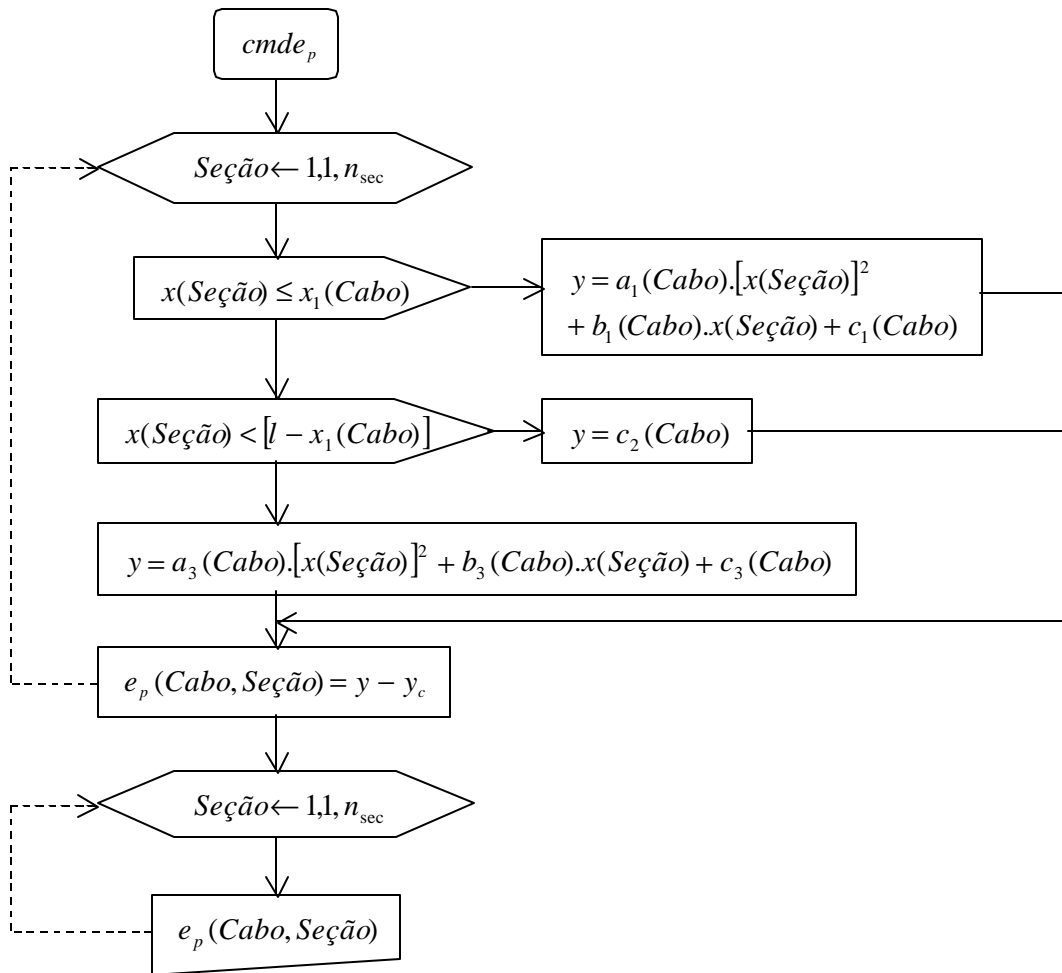


Figura 28 - Fluxograma para a excentricidade do cabo de protensão nas seções analisadas

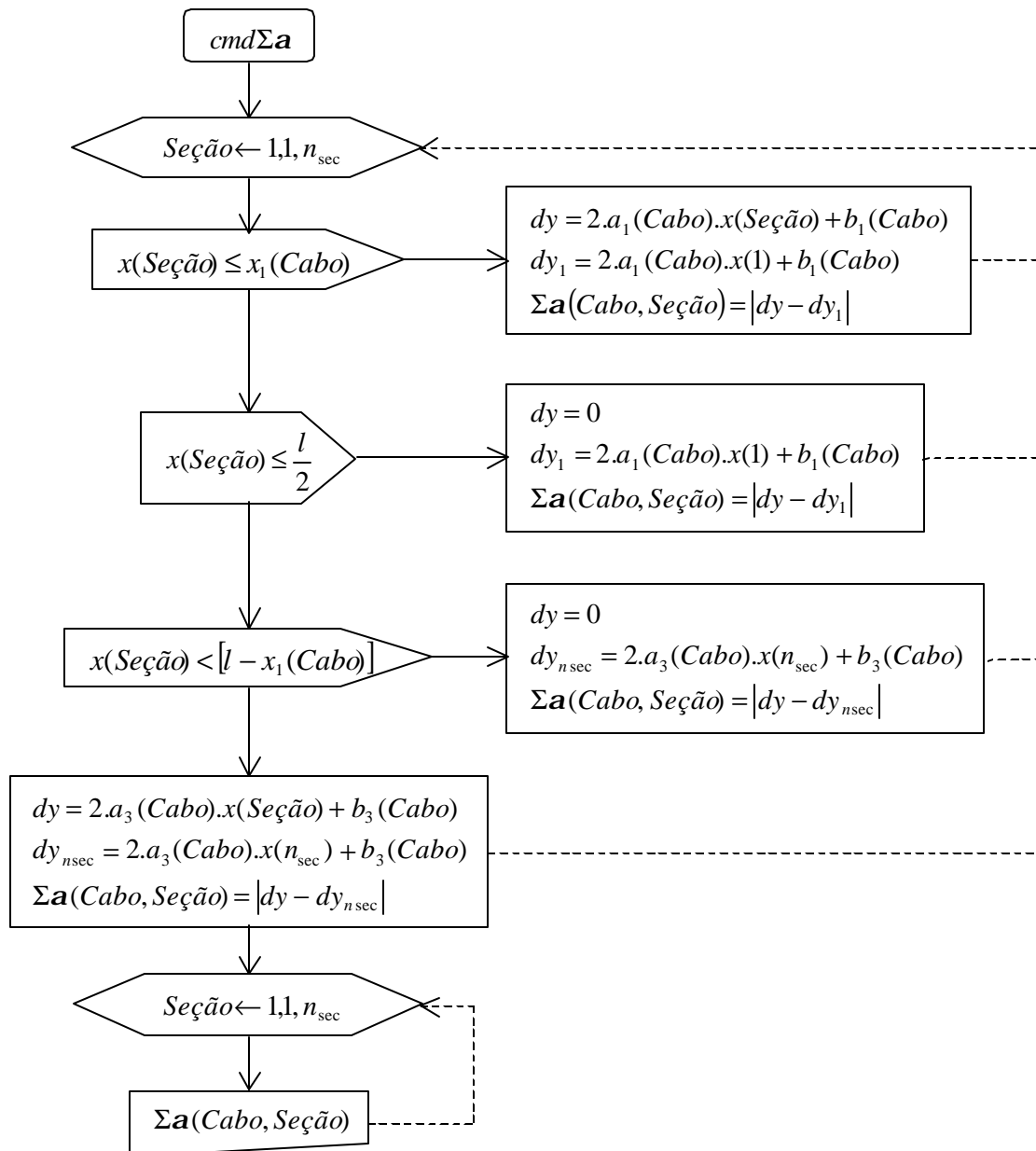
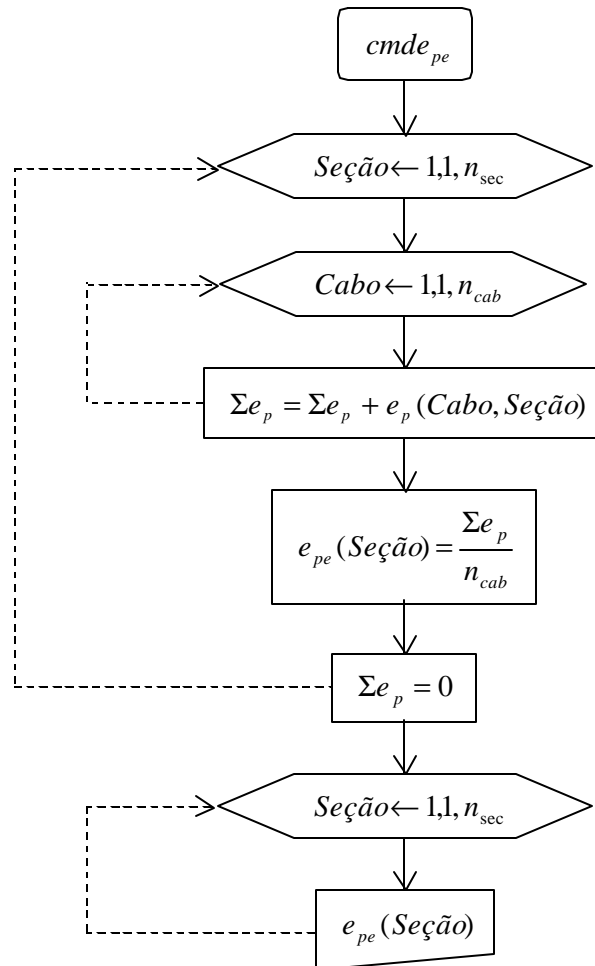


Figura 29 - Fluxograma para a soma dos ângulos de desvio previstos para cada cabo de protensão



**Figura 30 - Fluxograma para a excentricidade do cabo de protensão
equivalente nas seções analisadas**

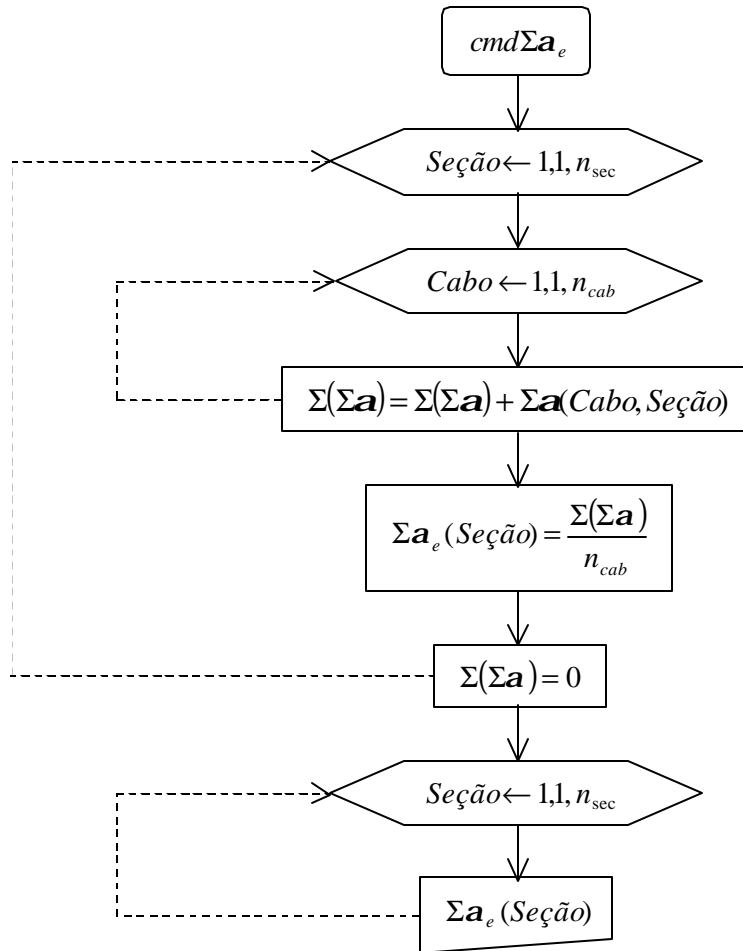


Figura 31 - Fluxograma para a soma dos ângulos de desvio previstos para o cabo de protensão equivalente

3.5 Perdas de protensão

No módulo anterior (Cabos), foram determinadas as características geométricas dos cabos de protensão, necessárias ao cálculo das perdas. Neste módulo (Perdas), serão determinadas as perdas de protensão, perdas estas que serão calculadas sobre o cabo equivalente. As perdas de protensão para o caso de pós-tração incluem as perdas imediatas e as perdas progressivas conforme descrito no item 2.6.

Nos procedimentos e rotinas do programa computacional, foi considerada a seguinte convenção de sinais para a força de protensão e perdas de protensão.

- Força de protensão (P), agindo no concreto → Negativa
- Perda na força de protensão (ΔP), agindo no concreto → Positiva
- Força de protensão (P), agindo no aço → Positiva
- Perda na força de protensão (ΔP), agindo no aço → Negativa

3.5.1 Tela Perdas

Para o cálculo das perdas na força de protensão, deverão ser fornecidos os dados solicitados na tela Perdas (Figura 32). Fornecido o dado ou dados solicitados, poderão ser calculadas as correspondentes perdas, com simultânea listagem e plotagem da força de protensão após as perdas, nas seções transversais da viga consideradas na análise.

Para se obter uma melhor visualização das curvas correspondentes à força de protensão, já descontadas as perdas, os diagramas foram truncados na ordenada $0,6P_i$, ou seja, os valores da força de protensão descontadas as perdas são plotados, subtraindo-se 60% do valor da força máxima aplicada à armadura pelo dispositivo de tração. Este truncamento é feito apenas nos valores plotados, nas caixas de lista são mostrados os valores totais da força de protensão descontadas as perdas.

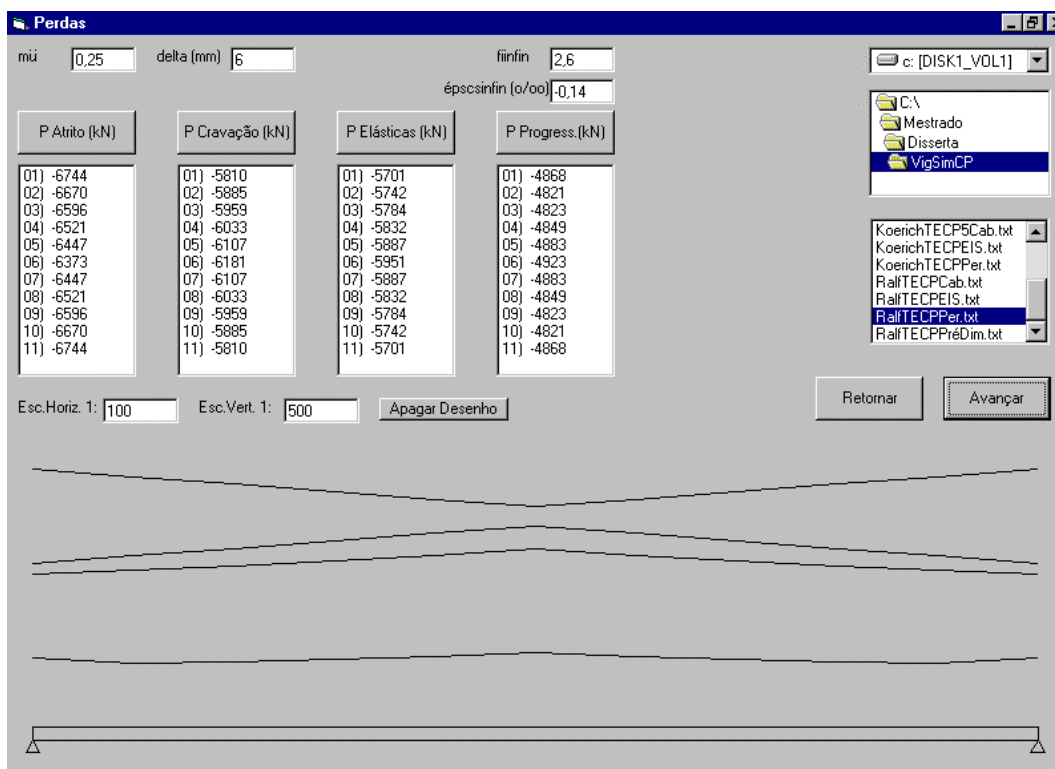


Figura 32 - Tela Perdas

3.5.2 Fluxogramas

Os fluxogramas das principais rotinas do módulo Perdas encontram-se neste item. Na Figura 33, mostra-se o fluxograma geral deste módulo e nas Figuras 34 a 38, os fluxogramas que compõem este fluxograma geral.

A Figura 34 apresenta o fluxograma da rotina que calcula as perdas por atrito.

As Figuras 35 e 36 mostram o fluxograma da rotina que determina as perdas por deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem, também chamadas de perdas por cravação.

Na Figura 37, é mostrado o fluxograma da rotina para determinação das perdas na força de protensão devido à protensão sucessiva dos cabos de protensão, aqui também denominadas de perdas elásticas.

Na Figura 38, é apresentado o fluxograma da rotina que determina as perdas progressivas de protensão. As perdas progressivas englobam as perdas por retração do concreto, as perdas por fluência do concreto e as perdas por relaxação da armadura de protensão.

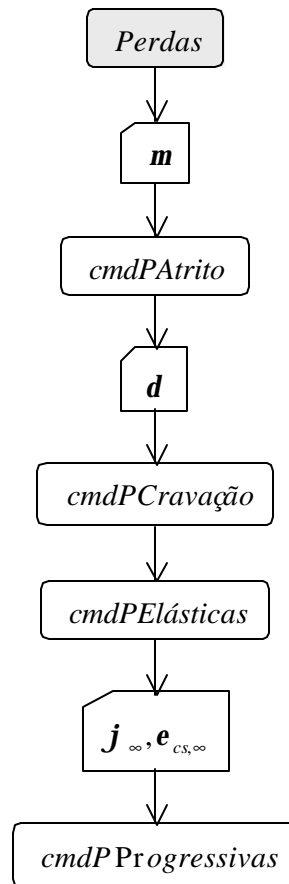


Figura 33 - Fluxograma geral do módulo Perdas

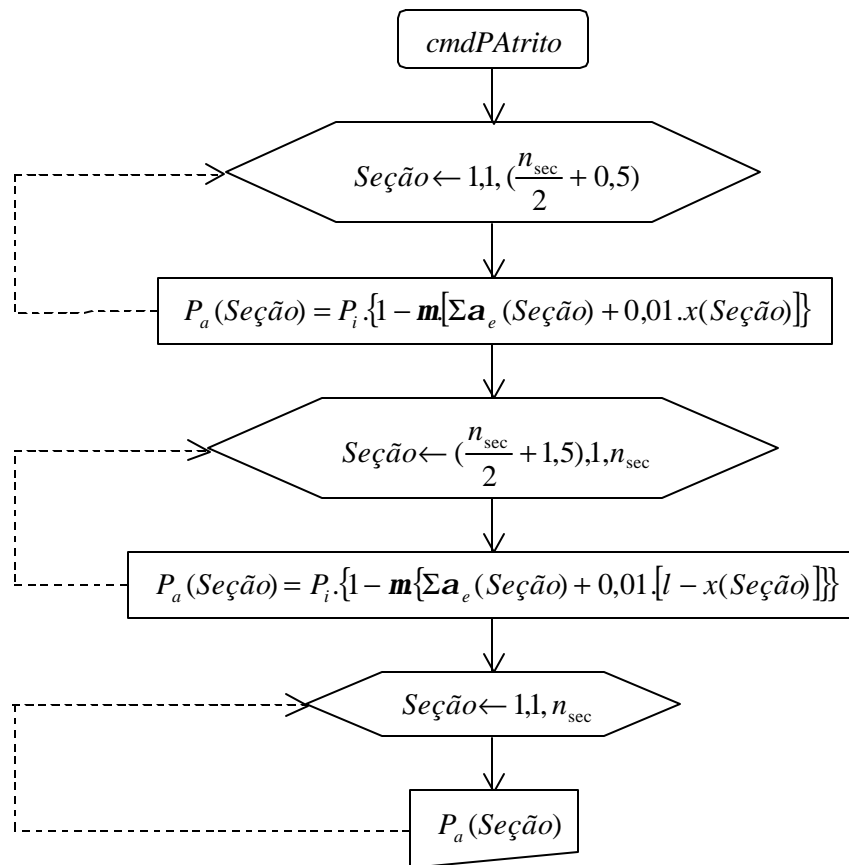


Figura 34 - Fluxograma para perdas por atrito

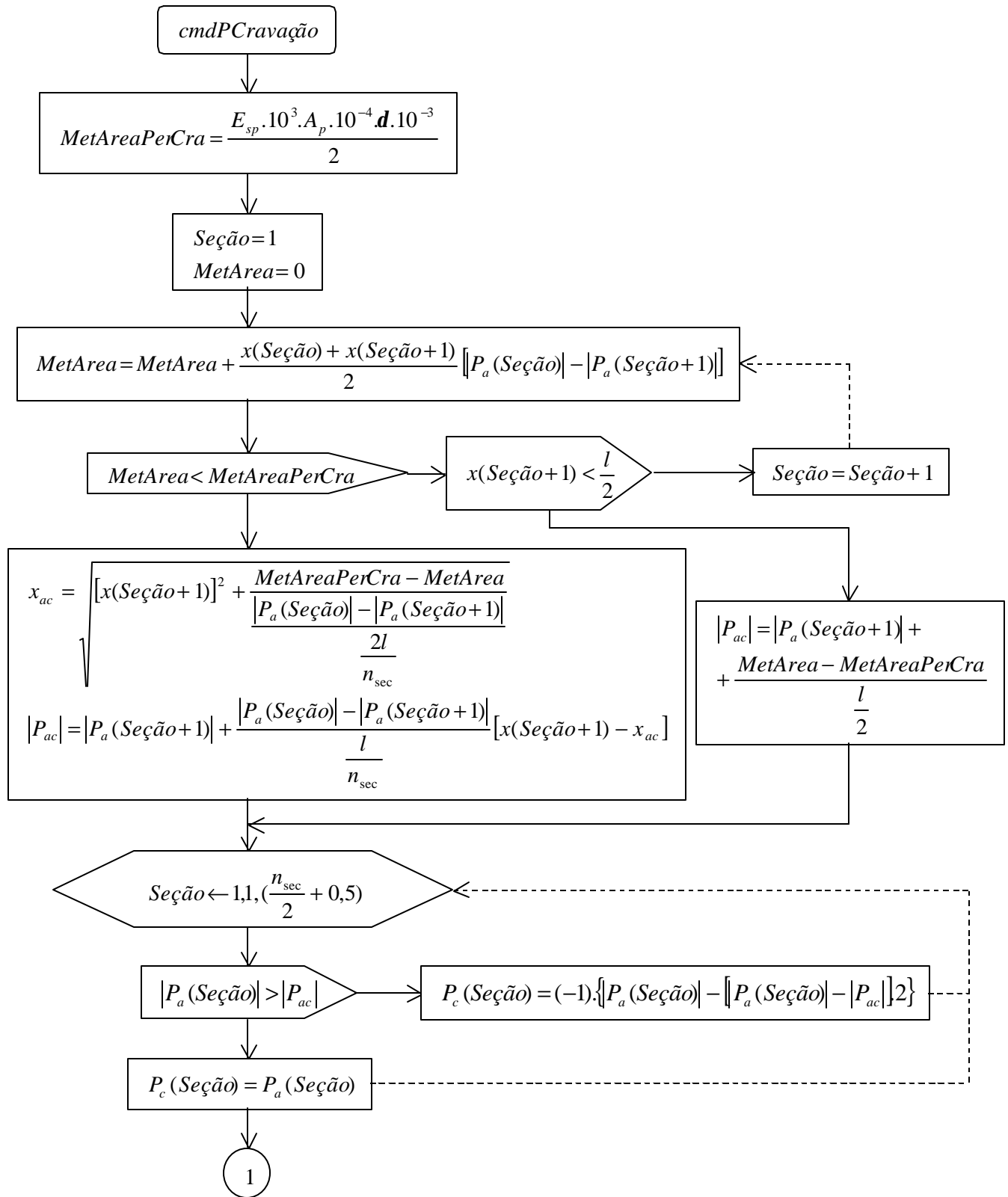


Figura 35 - Fluxograma 1 para perdas por cravação

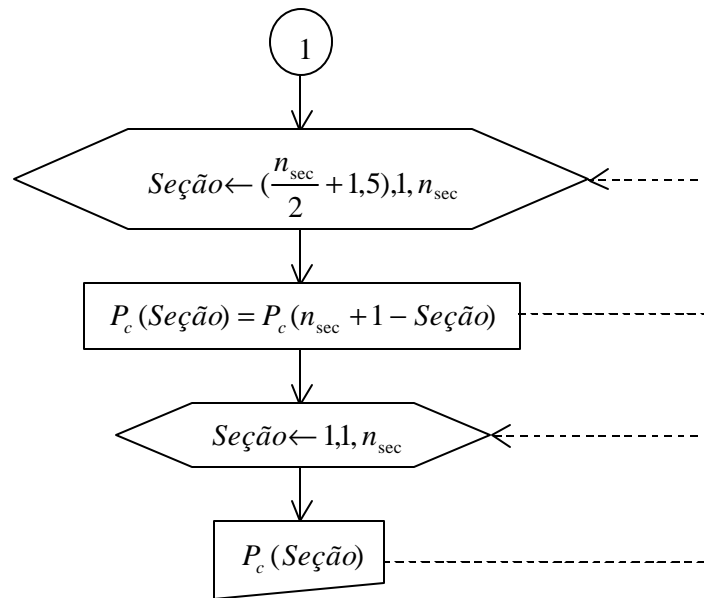


Figura 36 - Fluxograma 2 para perdas por cravação

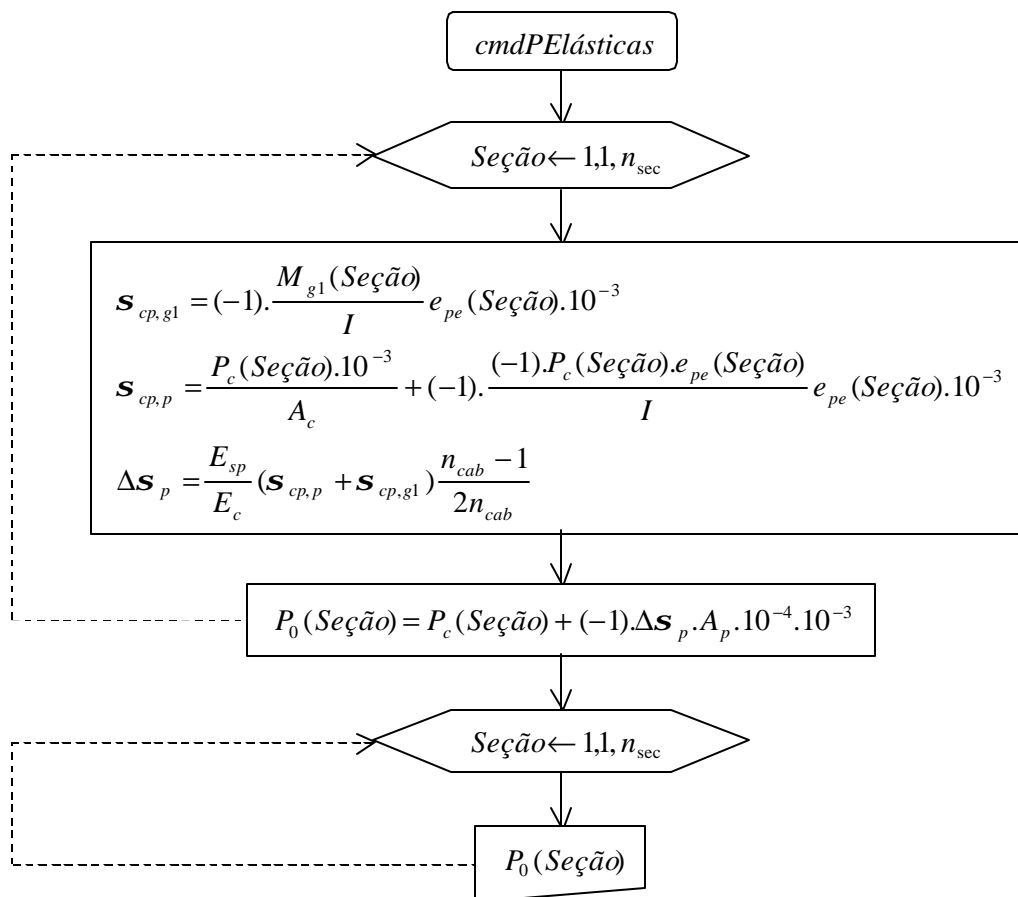


Figura 37 - Fluxograma para perdas elásticas

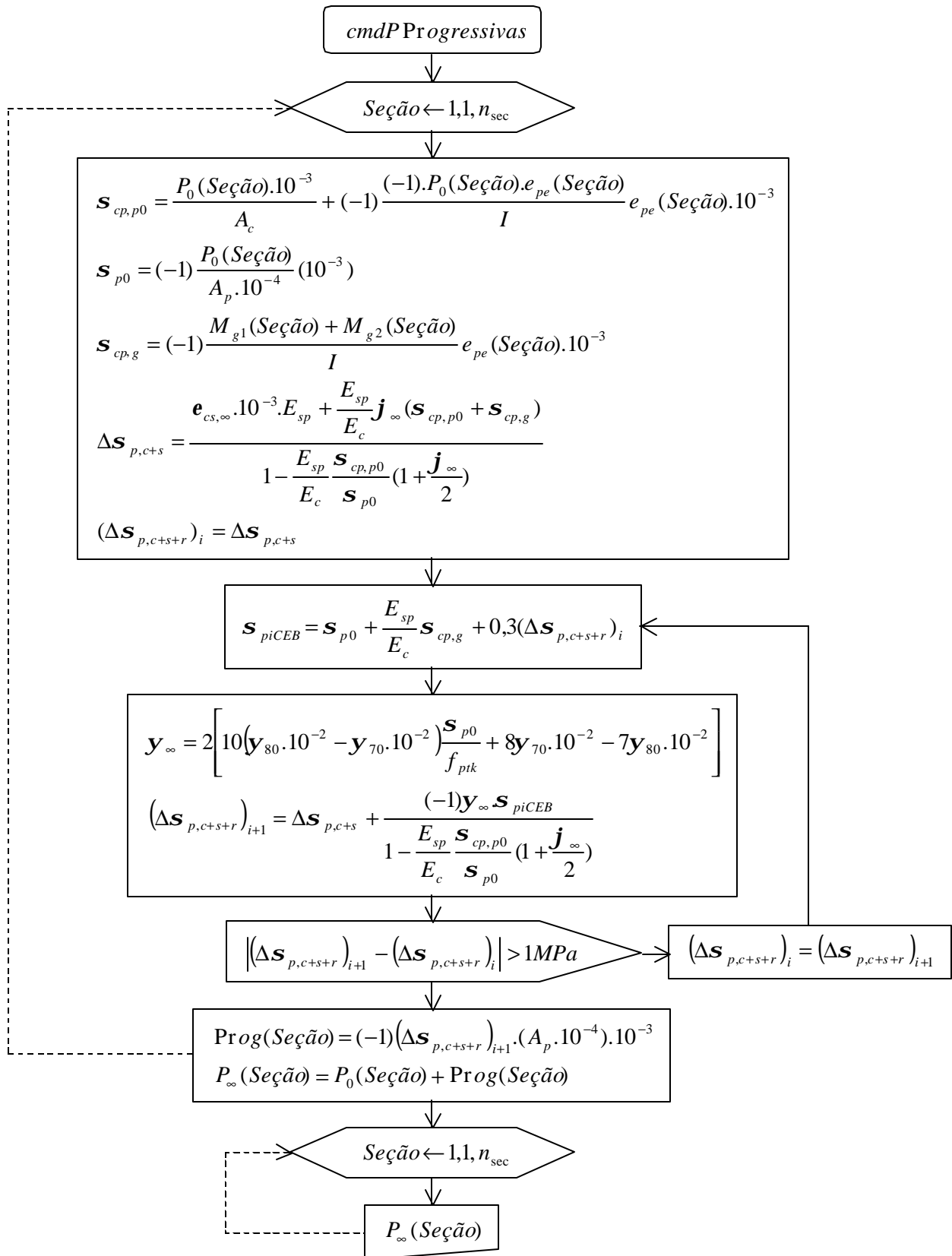


Figura 38 - Fluxograma para perdas progressivas

3.6 Verificação de tensões

Neste estágio do processamento, já foram fornecidos e/ou calculados os dados relevantes, tais como geometria longitudinal e da seção transversal da viga, nível de protensão desejado, carregamentos e combinações de ações, traçado dos cabos de protensão, características dos materiais e as perdas de protensão.

Neste módulo (VerifTens), serão calculadas as tensões na borda superior e inferior da seção transversal, nas seções em análise, para as combinações de ações de serviço a serem consideradas. Estas tensões devem atender às exigências dos estados limites de serviço correspondentes às combinações de ações, de acordo com o nível de protensão desejado.

3.6.1 Tela VerifTens

Todos os dados necessários à verificação de tensões nas seções em análise já estão disponíveis ao programa nesta ocasião. Acionando o botão de comando VerifTens (Figura 39), o programa listará:

- As principais características da viga consideradas na atual análise.
- As tensões na borda superior e inferior das seções consideradas para todos os carregamentos.
- As tensões nas bordas superior e inferior das seções consideradas para as combinações de ações correspondentes ao nível de protensão desejado.

Acionando os botões de comando Retornar das diversas telas é possível se deslocar a qualquer módulo, alterar dados e novamente avançar nos processamentos até se obter resultados satisfatórios.

VeriTens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Seç. Transv. T40x140 Aço CP 190 RB
 l (m) 20 Ac (m²) 1,2 CabProt 8 cord.12,7 Esp (MPa) 195000
 Protensão limitada g1 (kN/m) 64 l (m4) 0,201 ncab 6 SigmaELSCE (MPa) -17,5 / -15,0
 fck (MPa) 25 g2 (kN/m) 10 Ws (m3) 0,529 Ape (cm2) 48,096 SigmaELSF (MPa) 2,1
 Ec (MPa) 28000 q (kN/m) 50 Wí (m3) -0,197 Pi (kN) -6744 SigmaELSD (MPa) 0

Seção	epe (m)	P0 (kN)	Mg1 (kN.m)	Mg2 (kN.m)	0,5Prog. (kN)	0,7Mq (kN.m)	0,5Prog. (kN)	0,6Mq (kN.m)	0,5Prog. (kN)	SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Signal (MPa)	SomSignal (MPa)
Seção 01	-0,32	-5701	0	0	417	0	417	0	417	-1,3	-1,3	-14,0	-14,0
Protensão													
Final Constr.													
Comb. Freq.													
Comb. Q. Perm.													
Seção 02	-0,54	-5742	1152	180	460	630	460	540	460	1,0	1,0	-20,4	-20,4
Protensão													
Final Constr.													
Comb. Freq.													
Comb. Q. Perm.													
Seção 03	-0,70												

Figura 39 - Tela VeriTens

3.6.2 Fluxogramas

O fluxograma do módulo de verificação de tensões (VeriTens) com os principais blocos é apresentado na Figura 40.

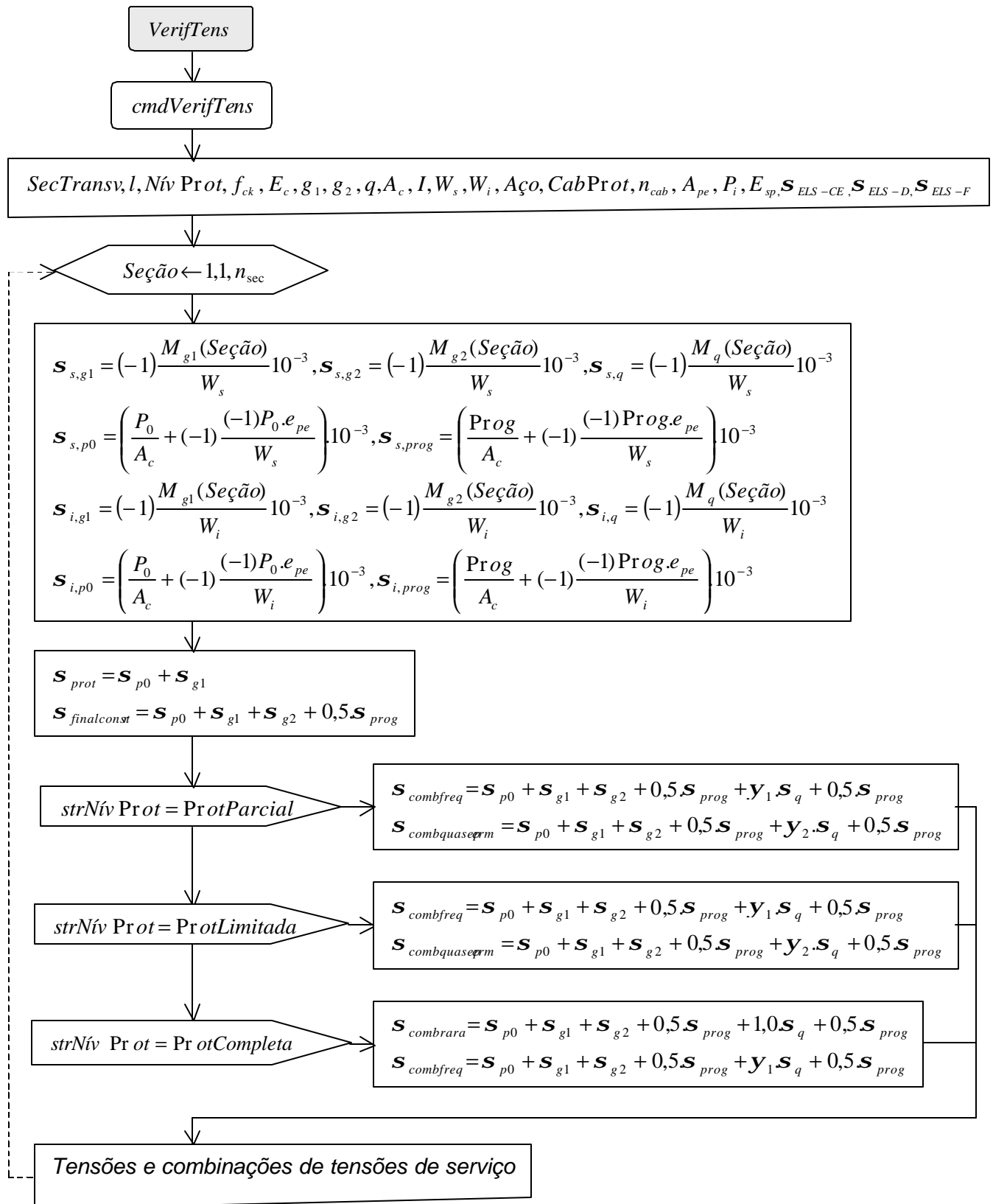


Figura 40 - Fluxograma do módulo VerifTens

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Neste capítulo, são apresentados três exemplos de vigas de concreto protendido resolvidas com o programa computacional desenvolvido. São analisadas soluções propostas pelos autores dos exemplos e comparadas com a solução decorrente da escolha automática de cabos feita pelo programa. Particularidades no desenvolvimento do projeto das vigas foram observadas, anotadas e comentadas. Algumas destas observações são perfeitamente compreensíveis, já outras dependem de mais estudos, inclusive de implementações computacionais adicionais, para tentar justificá-las. Com estes exemplos, objetivou-se também verificar a correção dos procedimentos e do código do programa.

No primeiro exemplo, mais que nos outros, foram descritos detalhes da operação do programa, paralelamente aos resultados e à análise dos resultados obtidos.

No segundo exemplo, a descrição do problema e a apresentação dos resultados foi feita de maneira abreviada e esquemática. A viga deste exemplo apresenta uma seção transversal excessiva, mas isto permitiu a observação e a confirmação de pontos estudados na teoria do concreto protendido. Por esta razão foi incluída neste trabalho.

No terceiro exemplo, foi apresentada uma viga com cabos de protensão junto à face superior. Implementações computacionais adicionais, a rigor, deveriam ter sido feitas para uma melhor análise deste problema. Observações e conclusões interessantes, entretanto, puderam ser obtidas com este exemplo.

Potencialidades do aplicativo foram ressaltadas, e como se poderá concluir ao ler estes exemplos, nos tempos atuais, não se concebe mais que vigas de concreto protendido sejam analisadas sem o auxílio de uma ferramenta computacional, embora os aplicativos voltados às peças de concreto protendido atualmente ainda sejam poucos.

4.1 Exemplo 1

Este exemplo foi resolvido originalmente pelo autor desta dissertação de forma manual ao cursar em 1999 a disciplina Tópicos Especiais de Concreto Protendido do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC. O exemplo foi extraído e adaptado de um projeto real de uma edificação industrial na cidade de Blumenau executado em estrutura de concreto armado. A solução aqui apresentada, utilizando o aplicativo desenvolvido, será baseada nos dados da solução original, para que se possam comparar os resultados.

O exemplo trata de vigas idênticas de concreto protendido de 20 m de vão que integram a estrutura do pavimento de um edifício que servirá para depósito de peças de cristal (Figura 41).

As vigas em suas extremidades apóiam-se nos pilares através de aparelhos de apoio de modo a permitir que as vigas possam se deformar livremente por ocasião da protensão. As lajes que se apóiam nas vigas são maciças e uma parte das lajes constitui a mesa da viga tipo T assim formada, como pode ser visto na Figura 42.

A viga típica é, portanto, simplesmente apoiada, tem 20 m de vão, uma altura total de 140 cm e sua seção transversal é do tipo T.

A viga será discretizada em segmentos de 2 m de comprimento, acarretando assim 11 seções de análise, que são informadas na tela EIS da Figura 43.

O peso próprio da viga é designado no programa computacional com a notação g_1 , sendo esta parcela do peso próprio mobilizada por ocasião da protensão da viga. A regularização e o revestimento das lajes será feito numa fase da obra posterior à fase de protensão, representando, portanto, este peso próprio uma carga permanente adicional, designada no programa pela notação g_2 . A carga acidental recebeu a notação q . Todos estes carregamentos foram informados na tela EIS da Figura 43.

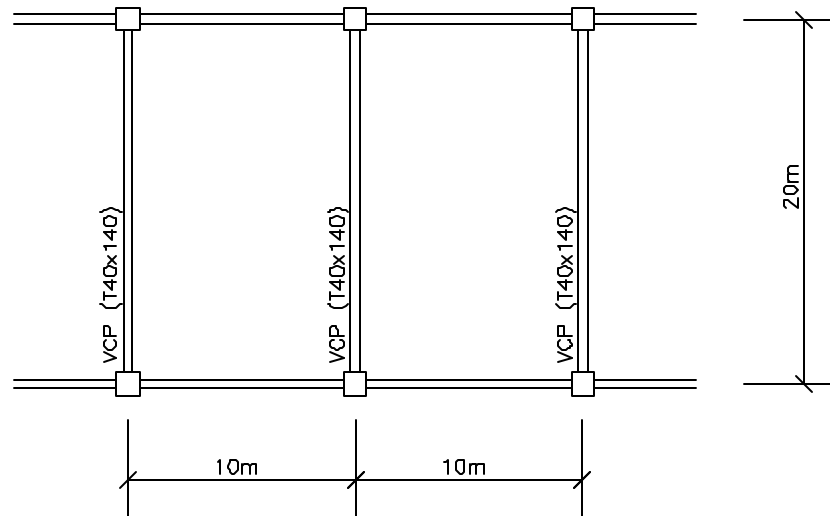


Figura 41 - Exemplo 1 - Esquema da planta baixa do pavimento da edificação

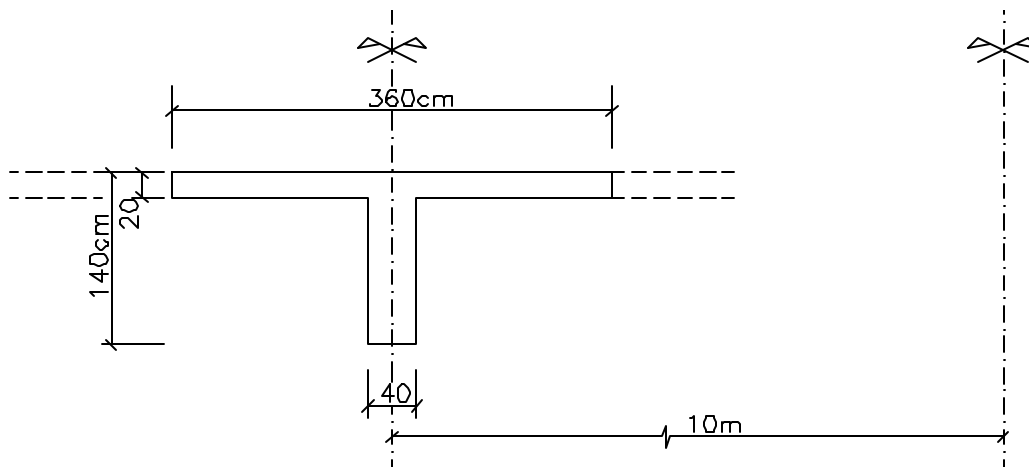


Figura 42 - Exemplo 1 - Esquema da seção transversal da viga

Os esforços internos solicitantes calculados nas seções consideradas na análise da viga também podem ser vistos na Figura 43.

A edificação se localiza numa região de clima industrial e umidade ambiente $U=80\%$, o que define a classe de agressividade ambiental II a considerar para a viga (Tabela 2).

Definida a classe de agressividade ambiental igual a III e considerando tratar-se de uma viga pós-tracionada, determina-se usando a Tabela 3 o nível mínimo de protensão que deve ser aplicado à viga, que, neste caso, é o nível 2, ou seja, a protensão limitada.

Ainda na Tabela 3, pode-se determinar, em função do nível de protensão, as combinações de ações a considerar na análise da viga e os estados limites de serviço que devem ser atendidos em cada combinação de ações. Tratando-se de protensão limitada, as combinações de ações a considerar são a combinação freqüente (CF) e a combinação quase-permanente (CQP), e os estados limites de serviço a serem atendidos são, respectivamente, o estado limite de formação de fissuras (ELS-F) e o estado limite de descompressão (ELS-D), além, logicamente, do estado limite de compressão excessiva (ELS-CE) que deve ser atendido em todas as fases da vida da estrutura.

Para as combinações de ações serão utilizados os fatores de redução para cargas acidentais de edifícios que constam na Tabela 4. Assim, tomou-se para o fator de redução de ações da combinação freqüente $\psi_1 = 0,7$ e para o fator de redução de ações da combinação quase-permanente $\psi_2 = 0,6$. O nível de protensão e os fatores de redução de ações foram fornecidos também na tela EIS da Figura 43.

Será utilizado o concreto estrutural de resistência característica de 25 MPa e a protensão da viga será feita aos 28 dias de idade do concreto. Informados estes dados, o módulo de elasticidade inicial do concreto é calculado e mostrado no alto à esquerda da tela PréDim da Figura 44.

Considerando um abatimento do concreto aplicado na obra $s = 4$ cm, a umidade ambiente $U = 80\%$, e a geometria da seção transversal (Figura 42), foi

determinado à parte o valor final da deformação específica por retração do concreto, $\varepsilon_{cs, \infty} = -0,14$ o/oo [Vasconcelos, 1980].

Com base na idade do concreto por ocasião da protensão, a umidade ambiente, o abatimento do concreto e as características geométricas da seção transversal, também foi determinado à parte o valor final do coeficiente de fluência do concreto, $\varphi_{\infty} = 2,6$ [Vasconcelos, 1980].

O tipo de seção transversal da viga influencia na determinação da resistência à tração na flexão do concreto. Informado o tipo de seção transversal (Figura 44), foi determinado o módulo de resistência mínimo que deve ter a seção transversal da viga para atender à máxima variação de tensões admissível em cada borda (ver seção 3.3.1).

Com base no módulo de resistência mínimo, foi adotada uma seção transversal e, na seqüência, foram fornecidas as suas características geométricas, conforme solicitado na tela PréDim da Figura 44. Validando-se os dados da seção transversal, é obtido o desenho longitudinal da viga com a posição do baricentro da seção transversal. Os fatores de escala foram escolhidos de modo a se obter a representação desejada da viga.

Os cabos de protensão terão ancoragens ativas em ambas extremidades.

A excentricidade do cabo de protensão equivalente relativamente ao baricentro da seção transversal da viga, na seção do meio do vão, deve ser estimada e fornecida ao programa para pré-dimensionar a força de protensão necessária ao final da vida útil da estrutura, ou seja, após a ocorrência de todas as perdas de protensão. Com este valor pré-dimensionado para a força de protensão é feita a escolha automática de cabos de protensão pelo programa. O programa escolhe o tipo de cabo e a quantidade necessária deste tipo, cuja força de protensão correspondente (considerada uma perda total de protensão de 24%) mais se aproxima do valor pré-dimensionado da força de protensão (ver fluxograma das Figuras 19 e 20).

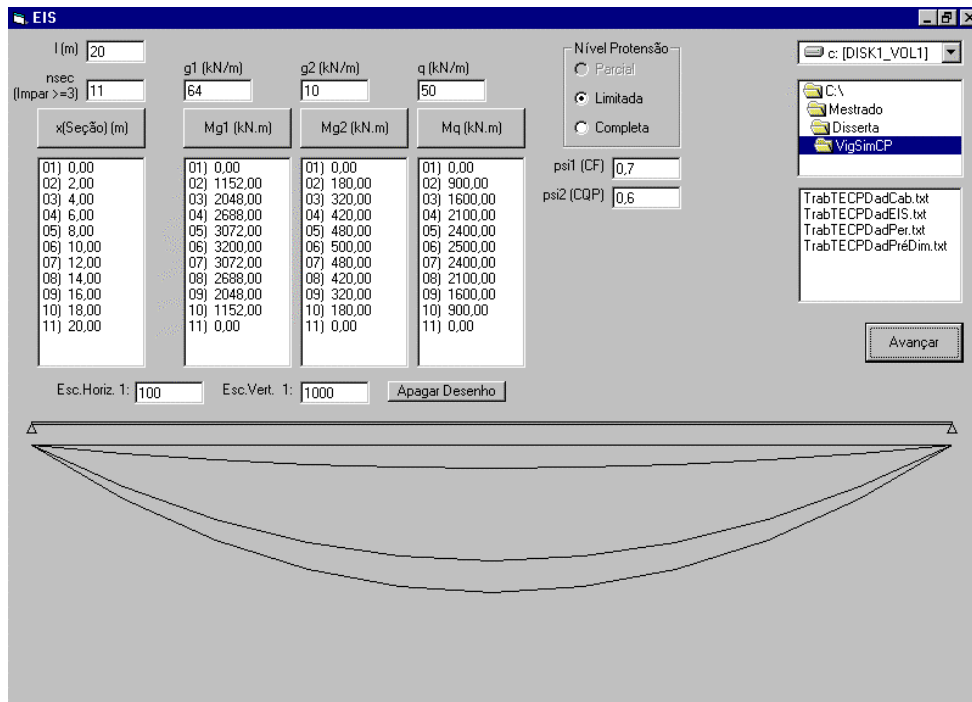


Figura 43 - Exemplo 1 - Determinação dos esforços internos solicitantes

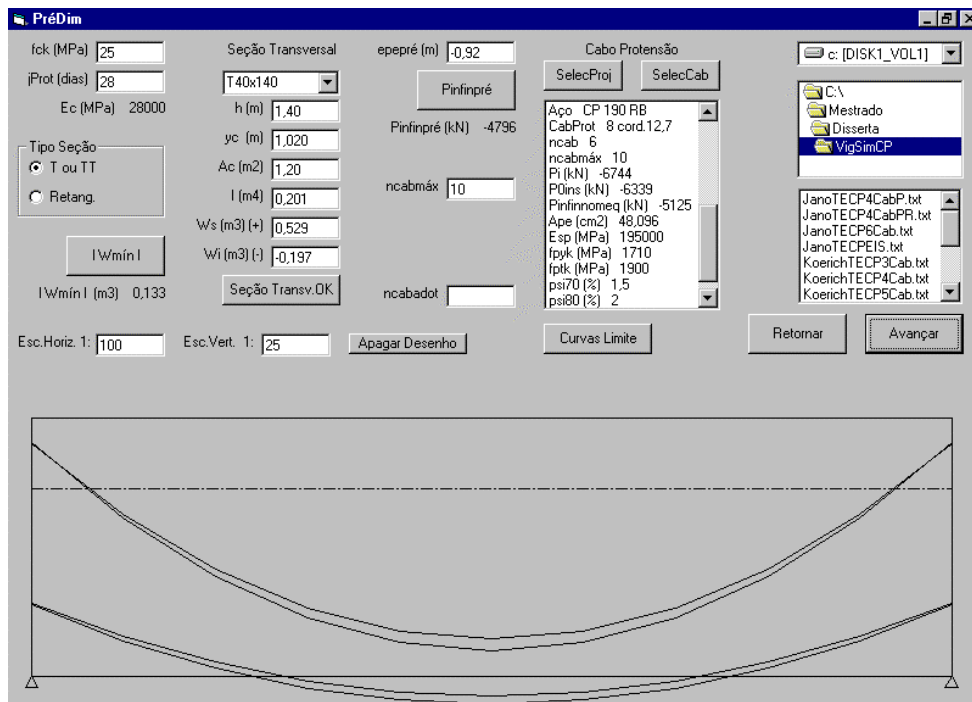


Figura 44 - Exemplo 1 - Fornecimento da seção transversal, escolha dos cabos de protensão e determinação das curvas limite

Da escolha automática, acionada pelo botão de comando SelecCab da tela PréDim, resultou: 3 cabos de protensão de 15 cordoalhas CP190RB de 12,7mm, o que representa um consumo total de aço de protensão $A_{pe} = 45,1\text{cm}^2$. Estavam disponibilizadas para esta escolha de cabos todas as cordoalhas de protensão implementadas no aplicativo, e que podem ser vistas na Figura 15.

Para esta escolha de cabos efetuada, foram traçadas as curvas limite correspondentes (ver seção 2.4), acionando o botão de comando CurvasLimite na tela PréDim da Figura 44.

A solução usando 3 cabos de 15 cordoalhas CP190RB de 12,7mm foi processada e, com relação às tensões nas bordas da viga para as combinações de ações a considerar e seus respectivos estados limites de serviço, mostrou-se satisfatória. Para evitar o alargamento da alma da viga nas extremidades de ancoragem exigida por esta solução e, considerando que a solução original do autor do problema prevê a utilização de cabos com 8 cordoalhas de 12,7mm, a solução com 3 cabos foi abandonada.

Para que o programa utilize apenas cabos com 8 cordoalhas de 12,7mm é necessário desabilitar as outras opções de cabos de protensão na tela PréDimCab. Esta tela é chamada pelo botão de comando SelecProj da tela PréDim. Efetuando uma nova escolha automática de cabos obteve-se: 6 cabos de 8 cordoalhas CP190RB de 12,7mm, o que representa um consumo de aço $A_{pe} = 48,1\text{cm}^2$. Detalhes desta escolha de cabos de protensão podem ser vistos na caixa de lista da Figura 44. A disposição dos cabos de protensão para esta solução, nas seções transversais dos apoios e do meio do vão, pode ser vista na Figura 45.

Com os cabos de protensão selecionados nesta última escolha, foram traçadas as novas curvas limite correspondentes à nova seleção de cabos. Estas curvas podem ser visualizadas no desenho da Figura 44 (1ª e 3ª curvas a partir de cima), juntamente com o par de curvas limite resultante da primeira escolha automática de cabos (2ª e 4ª curvas a partir de cima).

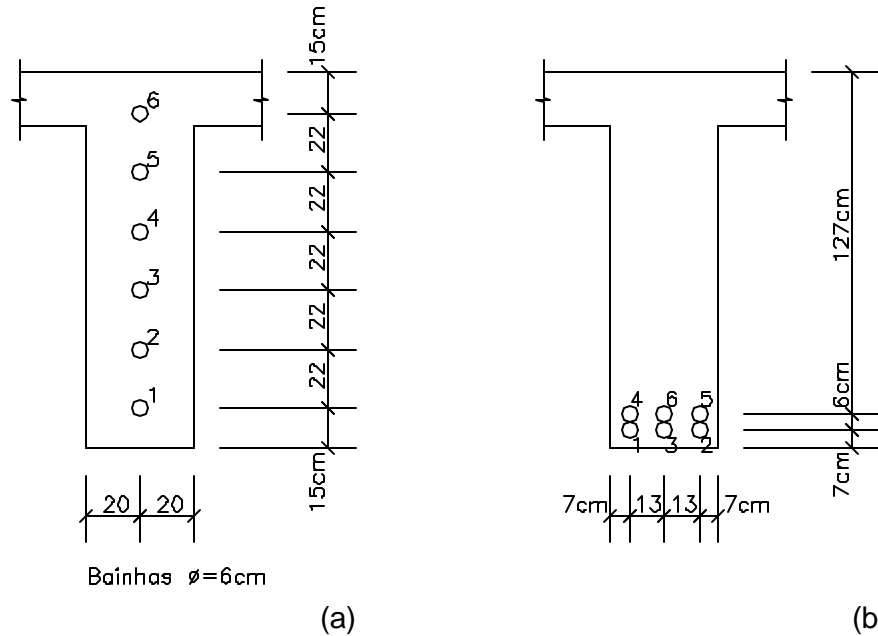


Figura 45 - Exemplo 1 - Disposição dos cabos de protensão na seção transversal da viga: (a) seção do apoio; (b) seção do meio do vão.

Conhecido o número de cabos de protensão que serão utilizados, passa-se ao lançamento dos cabos de protensão que foi feito na tela Cabos da Figura 46. As curvas limite podem ser reproduzidas na tela cabos para balizar o lançamento dos cabos.

Os 6 cabos de protensão lançados neste exemplo têm traçado parabólico. Detalhes da geometria dos cabos e das características geométricas necessárias ao cálculo das perdas de protensão (e_p e $\Sigma\alpha$), podem ser vistos nas caixas de lista e no desenho abaixo destas, na tela Cabos da Figura 46.

Lançados os cabos individuais e determinadas as suas características geométricas, pode ser obtido o cabo de protensão equivalente, que é um cabo único que representa todos os cabos de protensão individuais presentes na viga (ver seção 3.4.2). Na seqüência, são determinadas as características geométricas do cabo equivalente (e_{pe} e $\Sigma\alpha_e$) e o desenho do cabo equivalente, que é mostrado em traço mais escuro (Figura 46).

Com o cabo equivalente determinado, pode-se passar ao cálculo das perdas de protensão, que serão calculadas sobre o cabo de protensão equivalente.

Adotando para coeficiente de atrito aparente entre cabo e bainha $\mu = 0,25$ e para o coeficiente de perda por metro provocado por curvaturas não intencionais do cabo $k = 0,01\mu$ (rad/m), determinaram-se as perdas por atrito. Os valores da força de protensão descontadas as perdas por atrito, nas seções analisadas, podem ser vistos na tela Perdas (Figura 47) na 1ª caixa de lista a partir da esquerda. Mais abaixo, nesta mesma figura, na 1ª curva a partir de cima, estão plotados os valores da força de protensão já consideradas as perdas por atrito.

Considerando um deslocamento do cabo de protensão por deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem $\delta = 4$ mm podem ser determinadas as correspondentes perdas. A força de protensão no cabo equivalente já consideradas também as perdas por cravação, como também são conhecidas, são mostradas para as diversas seções na 2ª caixa de lista a partir da esquerda na Figura 47. A plotagem destes valores aparece na 2ª curva a partir de cima nesta mesma figura.

Devido à protensão não simultânea de todos os cabos de protensão, por ocasião da protensão de determinado cabo, ocorre um afrouxamento dos cabos já protendidos devido ao encurtamento elástico do concreto. As perdas elásticas podem ser determinadas, acionando o botão de comando PEIásticas e os valores da força de protensão, já descontadas também as perdas elásticas, encontram-se na 3ª caixa de lista a partir da esquerda (Figura 47). A plotagem destes valores é mostrada na 3ª curva a partir de cima nesta mesma figura.

A obtenção do valor final do coeficiente de fluência do concreto $\varphi_{\infty} = 2,6$ e o valor final da deformação específica do concreto $\varepsilon_{cs, \infty} = -0,14$ o/oo já foram comentados anteriormente nesta seção e devem ser informados na tela perdas. A relaxação das cordoalhas para protensão CP190RB, após 1000h, a

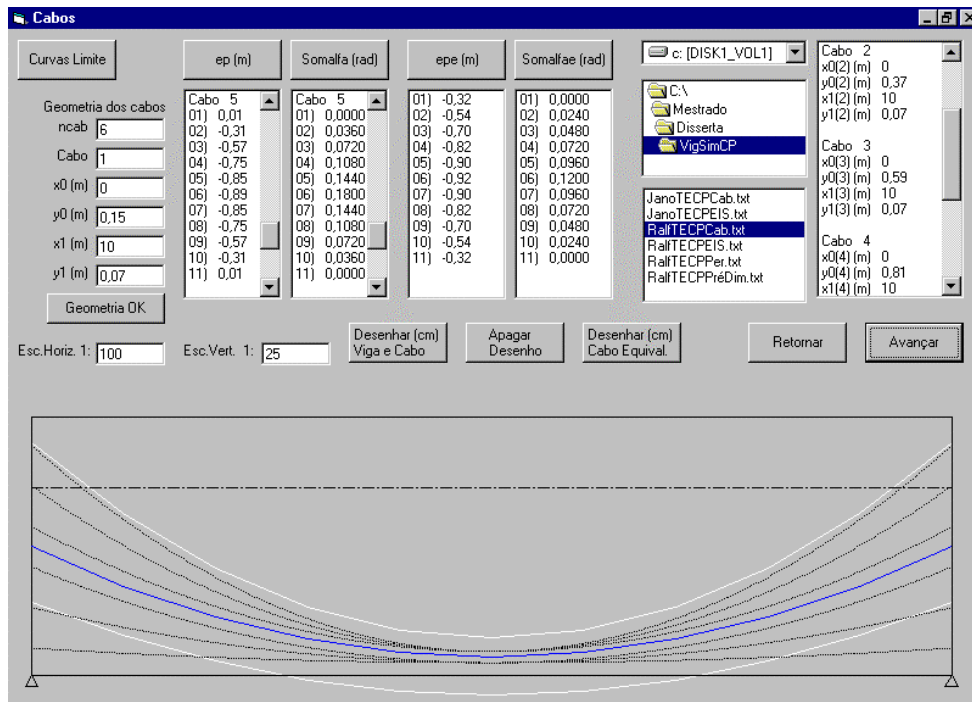


Figura 46 - Exemplo 1 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente

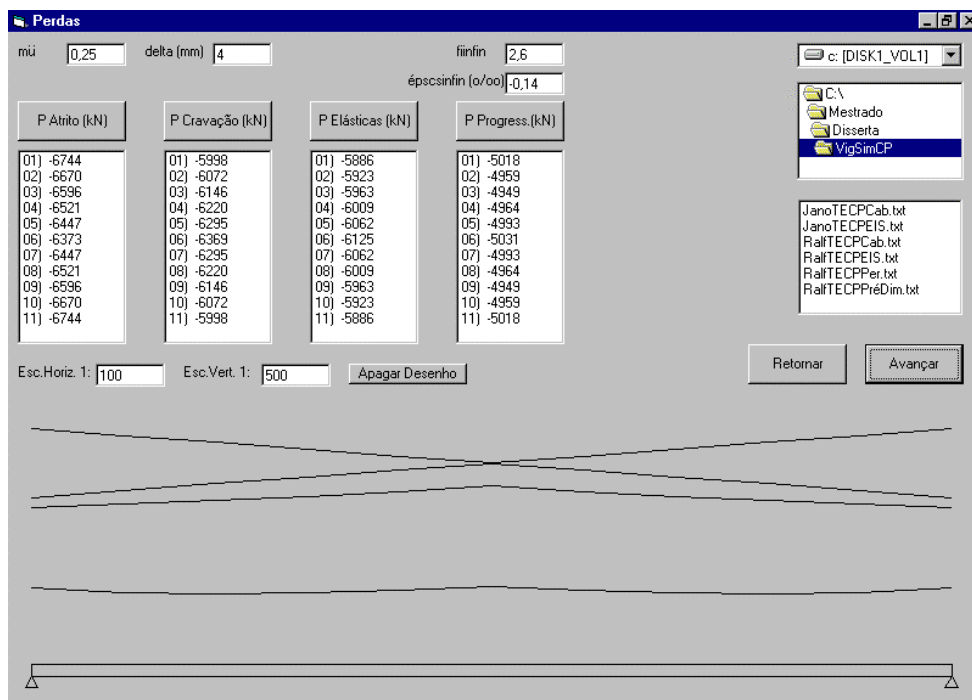


Figura 47 - Exemplo 1 - Determinação das perdas de protensão

20° C, para 70% e 80% da carga de ruptura, $\psi_{70} = 1,5\%$ e $\psi_{80} = 2\%$ respectivamente, encontram-se implementadas no programa computacional.

As perdas progressivas de protensão que compreendem as perdas por fluência do concreto, as perdas por retração do concreto e as perdas por relaxação da armadura de protensão, podem então ser calculadas. Os valores finais da força de protensão, incluídas também as perdas progressivas, ou seja, os valores da força de protensão ao final da vida útil da estrutura (P_{∞}), encontram-se listados na 4ª caixa de lista a partir da esquerda e plotados na última curva a partir de cima, na tela Perdas da Figura 47.

Nas curvas dos valores da força de protensão após as perdas e nas caixas de lista destes valores (Figura 47), pode-se observar facilmente:

1. As perdas totais na força de protensão não passaram de 26,6%.
2. O gráfico das perdas por atrito consta de uma única reta (até o meio da viga). Pelo fato de todos os cabos terem traçado parabólico, o cabo equivalente também constará de uma única parábola. Como as perdas por atrito dependem do desvio angular do cabo, que é linear numa parábola, as perdas por atrito resultam numa única reta em toda extensão (ver também seção 2.6.1 e fluxograma da Figura 34).
3. As perdas por cravação atingiram a seção central da viga.
4. As perdas elásticas são relativamente pequenas comparadas às outras perdas (máximo de 3,6%).
5. As perdas elásticas, ou seja, as perdas na força de protensão por deformação elástica do concreto devido à protensão sucessiva (não simultânea) dos cabos, são maiores na região central da viga.
6. O valor da força de protensão ao final da vida útil da estrutura (P_{∞}) é praticamente constante ao longo da viga (variação de 1,6%).

Na tela VerifTens da Figura 48, mostram-se, além das principais características da solução analisada, as tensões nas bordas superior e inferior das seções consideradas, para todos os carregamentos. É mostrada também, para as

bordas superior e inferior das seções analisadas, a soma das tensões para as combinações de ações que devem ser consideradas, tanto na fase de construção como na fase de utilização da viga.

Como se pode ver na Figura 48, as tensões nas bordas atendem às tensões limite correspondentes aos estados limite de serviço das diversas combinações de ações.

Combinação de ações	Tensões limite para borda superior e inferior
Fase de protensão	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-F}
Final de construção	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-F}
Combinação rara	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-F}
Combinação freqüente	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-D}

Pode-se então concluir que, com relação aos estados limites de serviço relacionados a tensões, a solução proposta resumida no alto da tela VerifTens (Figura 48) é satisfatória.

Da confrontação dos resultados aqui obtidos com os resultados da solução obtida manualmente observaram-se, nas tabelas da tela VerifTens, diferenças inferiores a 0,5% decorrentes de arredondamentos de cálculo. Foi feito também para este exemplo um acompanhamento numérico dos resultados intermediários e constataram-se, também, apenas pequenas diferenças numéricas inferiores a 0,5% decorrentes de arredondamentos de cálculo.

Se alguma tensão tivesse excedido os limites de tensões estabelecidos, uma solução seria, por exemplo, aumentar a resistência do concreto especificado, o que, porém, acarretaria algum custo adicional na execução. Outras vezes, entretanto, esta solução de aumentar a resistência do concreto especificado pode não ser viável.

VerifTens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Retornar

Seç.Transv. T40x140 Aço CP 190 RB
 l (m) 20 CabProt 8 cord.12,7 Esp (MPa) 195000
 Protensão limitada g1 (kN/m) 64 l (m4) 0,201 SigmaELSCE (MPa) -17,5 / -15,0
 fck (MPa) 25 g2 (kN/m) 10 Ws (m3) 0,529 Ape (cm2) 48,096 SigmaELSF (MPa) 2,1
 Ec (MPa) 28000 q (kN/m) 50 Wl (m3) -0,197 Pi (kN) -6744 SigmaELSD (MPa) 0

Seção	efe (m)		SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Signal (MPa)	SomSignal (MPa)
Seção 01	epe (m)		-0,32			
	P0 (kN)		-5886	-1,3	-1,3	-14,5
Protensão	Mg1 (kN.m)		0	0,0	-1,3	0,0
	Mg2 (kN.m)		0	0,0	-1,3	-14,5
Final Constr.	0,5Prog. (kN)		434	0,1	-1,2	1,1
	0,7Mq (kN.m)		0	0,0	-1,2	0,0
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)		434	0,1	-1,1	1,1
	0,6Mq (kN.m)		0	0,0	-1,2	0,0
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)		434	0,1	-1,1	1,1
Seção 02	epe (m)		-0,54			
	P0 (kN)		-5923	1,1	1,1	-21,1
Protensão	Mg1 (kN.m)		1152	-2,2	-1,1	5,8
	Mg2 (kN.m)		180	-0,3	-1,5	0,9
Final Constr.	0,5Prog. (kN)		482	-0,1	-1,5	1,7
	0,7Mq (kN.m)		630	-1,2	-2,7	3,2
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)		482	-0,1	-2,8	1,7
	0,6Mq (kN.m)		540	-1,0	-2,6	2,7
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)		482	-0,1	-2,6	1,7
Seção 03	epe (m)		-0,70			

(a)

VerifTens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Retornar

Seç.Transv. T40x140 Aço CP 190 RB
 l (m) 20 CabProt 8 cord.12,7 Esp (MPa) 195000
 Protensão limitada g1 (kN/m) 64 l (m4) 0,201 SigmaELSCE (MPa) -17,5 / -15,0
 fck (MPa) 25 g2 (kN/m) 10 Ws (m3) 0,529 Ape (cm2) 48,096 SigmaELSF (MPa) 2,1
 Ec (MPa) 28000 q (kN/m) 50 Wl (m3) -0,197 Pi (kN) -6744 SigmaELSD (MPa) 0

Seção	efe (m)		SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Signal (MPa)	SomSignal (MPa)
Seção 05	epe (m)		-0,90			
	P0 (kN)		-6062	5,2	5,2	-32,6
Protensão	Mg1 (kN.m)		3072	-5,8	-0,6	15,6
	Mg2 (kN.m)		480	-0,9	-1,5	2,4
Final Constr.	0,5Prog. (kN)		534	-0,5	-2,0	2,9
	0,7Mq (kN.m)		1680	-3,2	-5,1	8,5
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)		534	-0,5	-5,6	2,9
	0,6Mq (kN.m)		1440	-2,7	-4,7	7,3
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)		534	-0,5	-5,1	2,9
Seção 06	epe (m)		-0,92			
	P0 (kN)		-6125	5,5	5,5	-33,7
Protensão	Mg1 (kN.m)		3200	-6,0	-0,5	16,2
	Mg2 (kN.m)		500	-0,9	-1,4	2,5
Final Constr.	0,5Prog. (kN)		547	-0,5	-1,9	3,0
	0,7Mq (kN.m)		1750	-3,3	-5,2	8,9
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)		547	-0,5	-5,7	3,0
	0,6Mq (kN.m)		1500	-2,8	-4,8	7,6
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)		547	-0,5	-5,3	3,0

(b)

Figura 48 - Exemplo 1 - Tabelas de verificação de tensões de serviço: (a) seções 01 e 02; (b) seções 05 e 06.

Utilizando esta ferramenta computacional torna-se, entretanto, muito simples alterar qualquer outra variável relacionada ao problema. Pode-se, com pouco trabalho adicional, retornar nas etapas do projeto, alterar uma ou mais variáveis e novamente avançar, repetindo o processo quantas vezes convier, até se obter a solução desejada. Até mesmo soluções totalmente diferentes podem ser analisadas e estudadas, trabalho este que seria, porém, muito demorado sem o auxílio desta ferramenta computacional.

4.2 Exemplo 2

Este exemplo foi resolvido e apresentado originalmente por um aluno do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC ao cursar a disciplina Tópicos Especiais de Concreto Protendido em 2002.

O exemplo trata de uma viga simplesmente apoiada de concreto protendido de 25 m de vão. A seção transversal tipo "T" (Figura 49), tem a parte inferior da alma alargada para melhor alojar os cabos de protensão. A seção transversal adotada para esta viga é, na realidade, excessiva, mas isto permitiu confirmar conceitos abordados na teoria das curvas limite (seção 2.4).

No exemplo 2, os dados do problema e os resultados dos processamentos são apresentados de maneira abreviada. Para maiores detalhes com relação à obtenção dos dados e à operação do programa computacional, podem ser vistos os exemplos 1 e 3.

Para esta viga são apresentadas duas soluções em termos de cabos de protensão utilizados. A solução 1 foi proposta pelo autor do exemplo e a solução 2, obtida com o auxílio do programa, é uma alternativa viável para este problema.

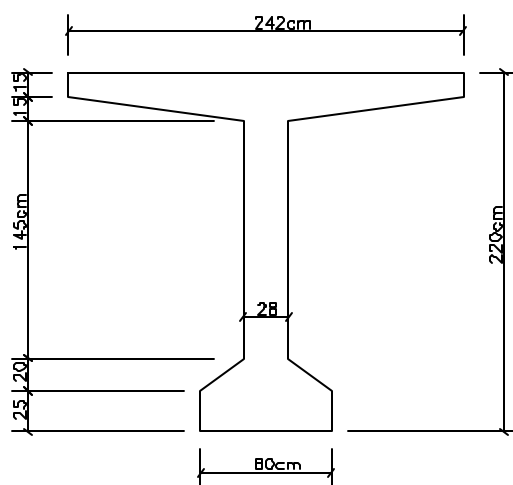


Figura 49 - Exemplo 2 - Esquema da seção transversal da viga

Na Figura 50 (tela EIS), foram fornecidos dados relacionados às ações a considerar e obtidos os esforços internos solicitantes.

- $n_{sec} = 21$, número de seções de análise, portanto 20 trechos de 1,25 m.
- $g_1 = 32$ kN/m, carga permanente mobilizada na protensão.
- $g_2 = 13$ kN/m, carga permanente aplicada após a protensão.
- $q = 65$ kN/m, carga acidental.
- M_{g1} , M_{g2} e M_t , momentos fletores nas seções analisadas, correspondentes aos carregamentos acima.
- Nível Protensão = Completa, nível de protensão desejado.
- $\psi_1 = 0,4$, fator de redução para as ações variáveis na combinação freqüente.

Na Figura 51 (tela PréDim), foram informados os materiais a serem utilizados e as características geométricas da seção transversal adotada. São também escolhidos os cabos de protensão e traçadas as curvas limite.

- $f_{ck} = 30$ MPa
- $j_{prot} = 28$ dias, idade do concreto na data da protensão.
- $E_c = 30672$ MPa, módulo de elasticidade inicial do concreto.
- Tipo Seção = T, tipo de seção transversal da viga.
- $|W_{min}| = 0,299$ m³, módulo de resistência mínimo que deve ter a seção transversal da viga (ver fluxograma da Figura 17).
- Características geométricas da seção transversal adotada (ver Figura 51).
- $e_{pe,pré} = -1,24$ m, avaliação da excentricidade do cabo de protensão equivalente na seção do meio do vão.
- $P_{\infty,pré} = -4188$ kN, pré-dimensionamento da força de protensão na seção do meio do vão, para atendimento da tensão admissível na borda inferior da viga, ao final da vida útil da estrutura (ver fluxograma da Figura 18).

Os cabos de protensão da viga terão ancoragens ativas em ambas extremidades.

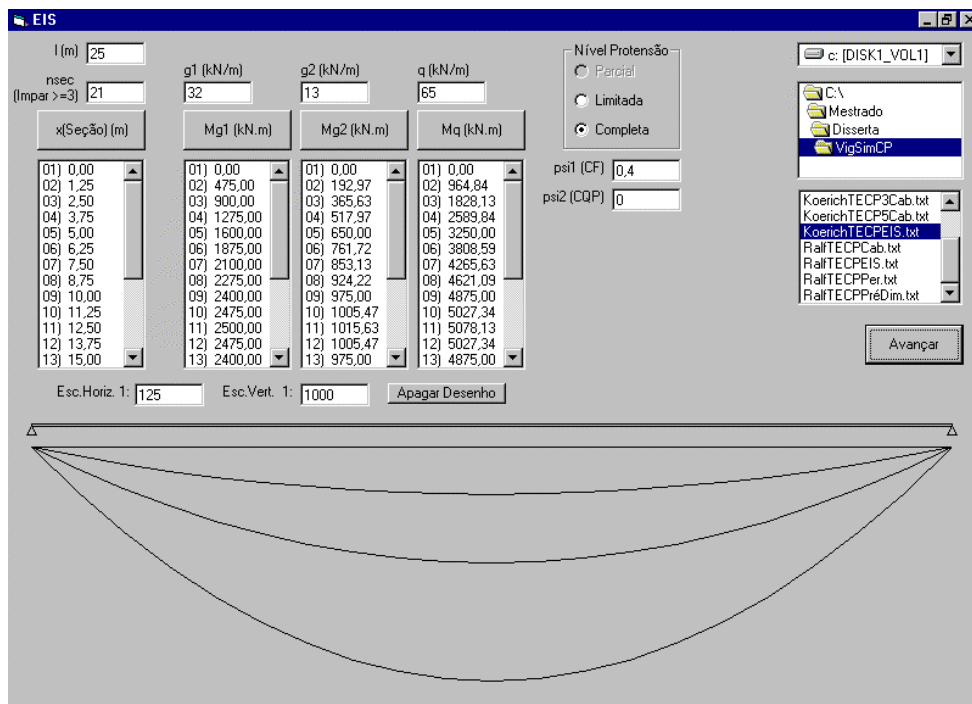


Figura 50 - Exemplo 2- Determinação dos esforços internos solicitantes

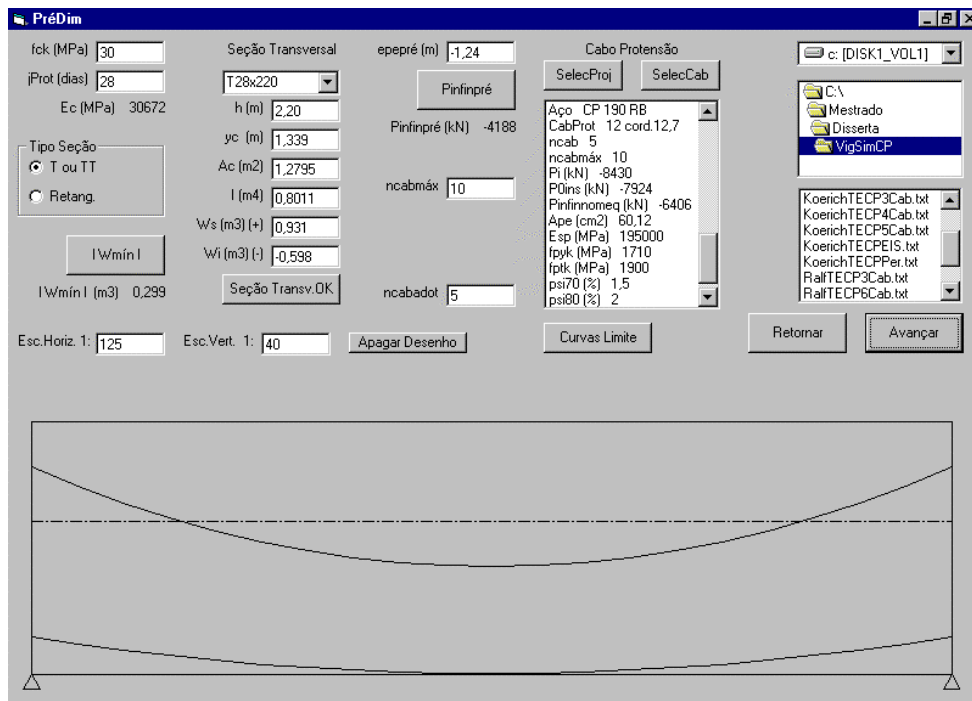


Figura 51 - Exemplo 2- Fornecimento da seção transversal, escolha dos cabos de protensão e determinação das curvas limite (5 cabos)

- Solução 1 (5 cabos)

A solução 1, proposta pelo autor do problema, considera 5 cabos de protensão de 12 cordoalhas de 12,7mm. Esta solução resulta numa área de seção transversal do cabo de protensão equivalente $A_{pe} = 60,1\text{cm}^2$ e numa força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração $P_T = 8430\text{ kN}$. A caixa de lista na parte central da Figura 51 mostra mais detalhes dos cabos de protensão para esta solução.

As curvas limite correspondentes à solução 1 estão desenhadas também na Figura 51. Na região delimitada pelas curvas limite, observa-se que, para a localização do cabo de protensão equivalente, há uma ampla região da viga, de forma a atender às tensões limite prescritas para as bordas. Desta forma, conclui-se que a solução proposta em termos de seção transversal e/ou cabos de protensão é antieconômica (ver também seção 2.4 e Figura 7).

Na Figura 52 (tela Cabos), foram lançados os cabos de protensão e foi obtido o cabo de protensão equivalente.

- Os cabos 1 e 2 são retilíneos e se localizam a 10 cm da face inferior da viga.
- Os cabos 3, 4 e 5 (de baixo para cima respectivamente) têm traçado parabólico-retilíneo e são mostrados também em traço preto.
- O cabo de protensão equivalente é o mostrado em traço azul. Suas excentricidades relativamente ao baricentro da seção são mostrados na caixa de lista abaixo do botão de comando e_e . A soma dos ângulos de desvio do cabo equivalente, entre a seção de ancoragem e a seção considerada, são mostrados na caixa de lista abaixo do botão de comando $\Sigma\alpha_e$.

Na Figura 53 (tela Perdas), foram determinadas as perdas de protensão. Alguns dados relacionados às perdas, ainda não disponíveis ao programa, também são fornecidos aqui.

- $\mu = 0,20$, coeficiente de atrito aparente entre cabo de protensão e bainha.

- $\delta = 4$ mm, deslocamento do cabo de protensão por deslizamento do cabo na ancoragem e acomodação da ancoragem.
- $\varphi_{\infty} = 3,0$, valor final do coeficiente de fluência do concreto.
- $\varepsilon_{cs, \infty} = -0,090$ o/oo , valor final da deformação específica por retração do concreto.
- Perdas por atrito; os valores da força de protensão, nas seções consideradas ao longo da viga, já descontadas as perdas por atrito, constam na 1ª caixa de lista a partir da esquerda. A plotagem destes valores é mostrada na 1ª curva a partir de cima.
- Perdas por cravação; os valores da força de protensão já descontadas as perdas por atrito e as perdas por cravação constam na 2ª caixa de lista a partir da esquerda. A plotagem destes valores é mostrada na 2ª curva a partir de cima.
- Perdas elásticas; os valores da força de protensão já descontadas as perdas por atrito, as perdas por cravação e também as perdas elásticas, é mostrada na 3ª caixa de lista a partir da esquerda. A plotagem destes valores está na 3ª curva a partir de cima.
- Perdas progressivas; os valores da força de protensão já descontadas todas as perdas de protensão (imediatas e progressivas), é mostrada na 4ª caixa de lista de lista a partir da esquerda. A plotagem destes valores está na última curva a partir de cima.

Com relação às perdas de protensão convém observar:

1. As perdas totais na força de protensão ($\Delta P_{\text{máx}}$) chegaram a 32,7%.
2. As perdas por atrito não são lineares, ao contrário do que foi observado no exemplo 1. Isto se deve ao fato do cabo de protensão equivalente não constar apenas de uma única parábola.
3. As perdas por cravação chegaram à seção do meio do vão.
4. As perdas elásticas são maiores na parte central da viga onde a força de protensão é maior.
5. As perdas elásticas são pequenas comparadas às outras perdas (máximo de 3,1%).

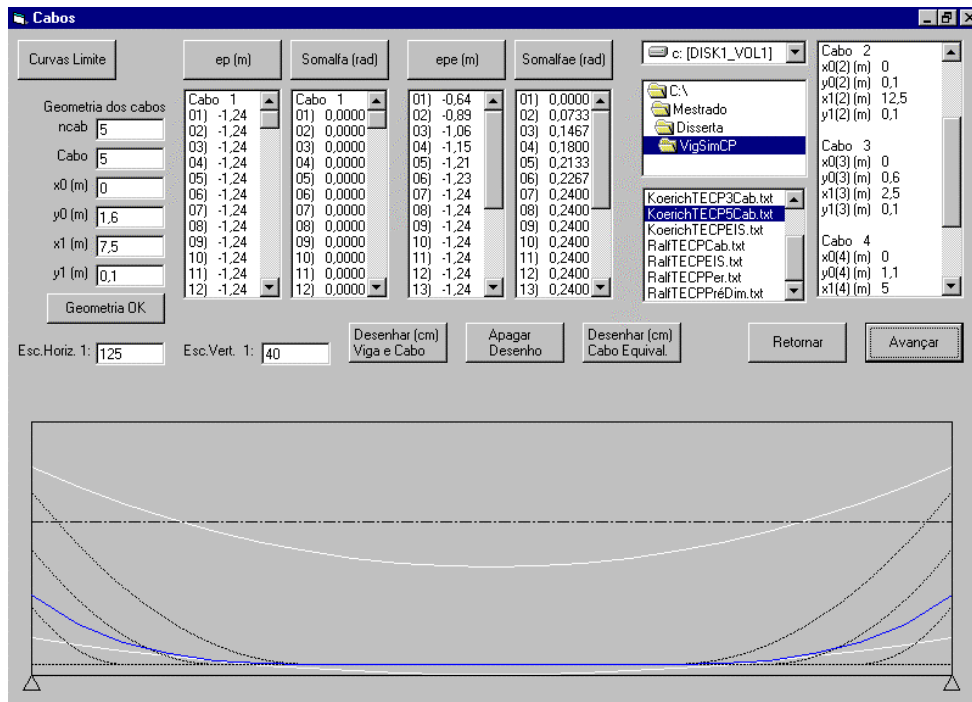


Figura 52 - Exemplo 2 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente (5 cabos)

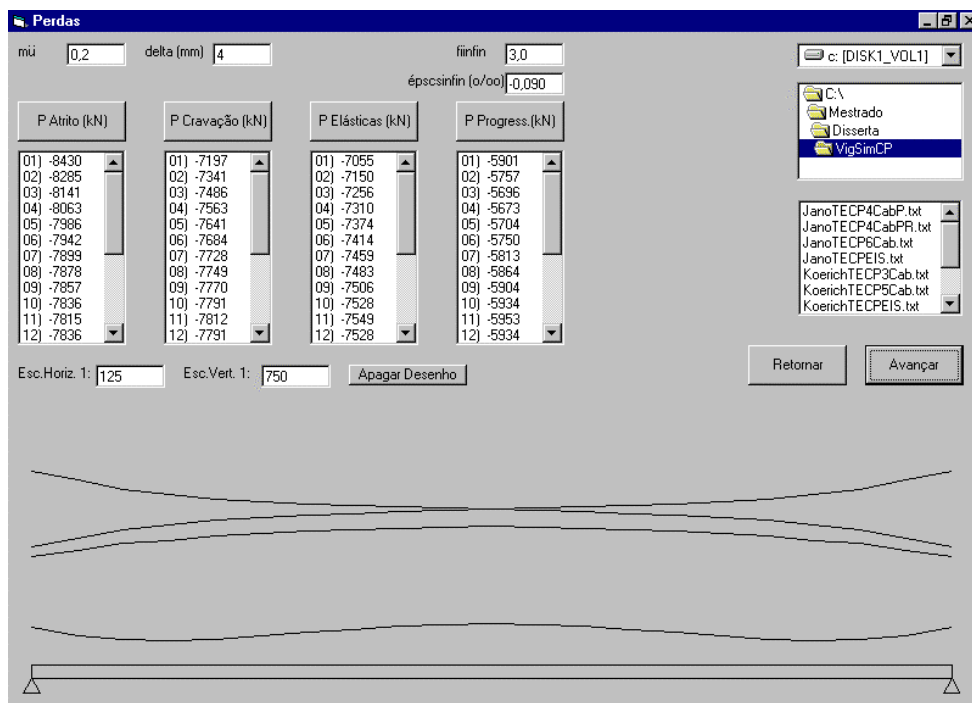


Figura 53 - Exemplo 2 - Determinação das perdas de protensão (5 cabos)

6. A força de protensão final ao longo da viga tem uma variação máxima de 4,4%.

Na Figura 54 (tela VerifTens), é apresentada a análise de tensões efetuada para a viga analisada. Foram listadas aqui:

- Principais características da viga analisada.
- Tensões limite para atendimento dos estados limite de serviço.
- Tensões na borda superior e inferior das seções analisadas para todos os carregamentos.
- Tensões na borda superior e inferior das seções analisadas para todas as combinações de carregamentos.

Devido à simetria da viga em relação à seção do meio do vão, é suficiente que sejam analisadas as tensões apenas nas seções 1 a 11. Da análise das tensões listadas observa-se que as tensões nas bordas superior e inferior de todas as seções e para todas as combinações de carregamentos, atendem às tensões limite das combinações de ações, correspondentes ao nível de protensão considerado.

Combinação de ações	Tensões limite para borda superior e inferior
Fase de protensão	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-F}
Final de construção	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-F}
Combinação rara	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-F}
Combinação freqüente	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-D}

Diante disto, pode-se concluir que a solução 1 (5 cabos), resumida no alto da tela VerifTens da Figura 54, atende aos estados limite de serviço relacionados a tensões.

Vale observar que as expectativas para as tensões nas bordas das seções, devido à posição do cabo de protensão equivalente relativamente às curvas limite foram confirmadas, ou seja, como o cabo de protensão equivalente está

VerifTens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Retornar

Seq. Transv. T28x220
l (m) 25
Protensão completa g1 (kN/m) 32
fck (MPa) 30 g2 (kN/m) 13
Ec (MPa) 30672 q (kN/m) 65

Ac (m²) 1,2795
l (m⁴) 0,8011
Ws (m³) 0,931
Wi (m³) -0,598

Aço CP 190 RB
CabProt 12 cord.12,7
ncab 5
Ape (cm²) 60,12
Pi (kN) -8430

Esp (MPa) 195000
SigmaELSCE (MPa) -21,0 / -18,0
SigmaELSF (MPa) 2,4
SigmaELSD (MPa) 0

Seção	epe (m)	SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSigmal (MPa)
Seção 04	-1,15				
P0 (kN)	-7310	3,3	3,3	-19,8	-19,8
Protensão					
Mg1 (kN.m)	1275	-1,4	2,0	2,1	-17,7
Mg2 (kN.m)	518	-0,6	1,4	0,9	-16,8
Final Constr.					
0,5Prog. (kN)	819	-0,4	1,0	2,2	-14,6
1,0Mq (kN.m)	2590	-2,8	-1,8	4,3	-10,2
Comb.Rara					
0,5Prog. (kN)	819	-0,4	-2,1	2,2	-8,0
0,4Mq (kN.m)	1036	-1,1	-0,1	1,7	-12,8
Comb.Freq.					
0,5Prog. (kN)	819	-0,4	-0,5	2,2	-10,6
Seção 05	-1,21				
P0 (kN)	-7374	3,8	3,8	-20,6	-20,6
Protensão					
Mg1 (kN.m)	1600	-1,7	2,1	2,7	-18,0
Mg2 (kN.m)	650	-0,7	1,4	1,1	-16,9
Final Constr.					
0,5Prog. (kN)	835	-0,4	0,9	2,3	-14,5
1,0Mq (kN.m)	3250	-3,5	-2,5	5,4	-9,1
Comb.Rara					
0,5Prog. (kN)	835	-0,4	-3,0	2,3	-6,8
0,4Mq (kN.m)	1300	-1,4	-0,5	2,2	-12,4
Comb.Freq.					
0,5Prog. (kN)	835	-0,4	-0,9	2,3	-10,0

(a)

VerifTens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Retornar

Seq. Transv. T28x220
l (m) 25
Protensão completa g1 (kN/m) 32
fck (MPa) 30 g2 (kN/m) 13
Ec (MPa) 30672 q (kN/m) 65

Ac (m²) 1,2795
l (m⁴) 0,8011
Ws (m³) 0,931
Wi (m³) -0,598

Aço CP 190 RB
CabProt 12 cord.12,7
ncab 5
Ape (cm²) 60,12
Pi (kN) -8430

Esp (MPa) 195000
SigmaELSCE (MPa) -21,0 / -18,0
SigmaELSF (MPa) 2,4
SigmaELSD (MPa) 0

Seção	epe (m)	SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSigmal (MPa)
Seção 10	-1,24				
P0 (kN)	-7528	4,1	4,1	-21,5	-21,5
Protensão					
Mg1 (kN.m)	2475	-2,7	1,5	4,1	-17,3
Mg2 (kN.m)	1005	-1,1	0,4	1,7	-15,7
Final Constr.					
0,5Prog. (kN)	797	-0,4	0,0	2,3	-13,4
1,0Mq (kN.m)	5027	-5,4	-5,4	8,4	-5,0
Comb.Rara					
0,5Prog. (kN)	797	-0,4	-5,9	2,3	-2,7
0,4Mq (kN.m)	2011	-2,2	-2,2	3,4	-10,0
Comb.Freq.					
0,5Prog. (kN)	797	-0,4	-2,6	2,3	-7,7
Seção 11	-1,24				
P0 (kN)	-7549	4,1	4,1	-21,5	-21,5
Protensão					
Mg1 (kN.m)	2500	-2,7	1,5	4,2	-17,4
Mg2 (kN.m)	1016	-1,1	0,4	1,7	-15,7
Final Constr.					
0,5Prog. (kN)	798	-0,4	-0,1	2,3	-13,4
1,0Mq (kN.m)	5078	-5,5	-5,5	8,5	-4,9
Comb.Rara					
0,5Prog. (kN)	798	-0,4	-6,0	2,3	-2,6
0,4Mq (kN.m)	2031	-2,2	-2,2	3,4	-10,0
Comb.Freq.					
0,5Prog. (kN)	798	-0,4	-2,7	2,3	-7,7

(b)

**Figura 54 - Exemplo 2 - Tabelas de verificação de tensões de serviço
(5 cabos): (a) seções 04 e 05; (b) seções 10 e 11.**

dentro da região delimitada pelas curvas limite, as tensões nas bordas ficaram abaixo das tensões máximas admissíveis para elas. Na região da viga, onde o cabo de protensão equivalente mais se aproxima da curva limite (inferior), as tensões na borda ficaram mais próximas das tensões limite (ver setas na Figura 54 (a)).

- Solução 2 (4 cabos)

Da escolha automática de cabos, feita com todos os cabos de protensão implementados no programa computacional (ver Figura 15), resultou: 2 cabos de 20 cordoalhas de 12,7mm CP190RB com um consumo total de aço $A_{pe} = 40,1 \text{ cm}^2$. Devido às limitações geométricas da peça não se usarão cabos de protensão com mais de 12 cordoalhas de 12,7mm, e desta forma, dever-se-ia utilizar 4 cabos com uma área total $A_{pe} = 48,1 \text{ cm}^2$, gerando um acréscimo no consumo de aço de 20%. A solução usando 3 cabos com 12 cordoalhas de 12,7mm e consumo de aço $A_{pe} = 36,1 \text{ cm}^2$ foi estudada e, como seria de se esperar, devido à força de protensão insuficiente, as tensões, na borda inferior, para a combinação rara, excederam $\sigma_{ELS-F} = 2,4 \text{ MPa}$. Sugere-se, assim, estudar a utilização de 4 cabos com 10 cordoalhas de 12,7mm com um consumo de aço $A_{pe} = 40,1 \text{ cm}^2$.

Na Figura 55 (tela PrédDim), onde é feita a escolha automática de cabos, pode-se visualizar detalhes dos cabos para a solução 2 (4 cabos) e as curvas limite correspondentes às soluções 1 e 2.

- As curvas limite 1^a e 3^a a partir de cima, correspondem à solução com 5 cabos de 12 cordoalhas de 12,7mm.
- As curvas limite 2^a e 4^a a partir de cima, correspondem à solução com 4 cabos de 10 cordoalhas de 12,7mm. Observa-se que com esta solução ainda resulta uma região adequada para localização do cabo de protensão equivalente.

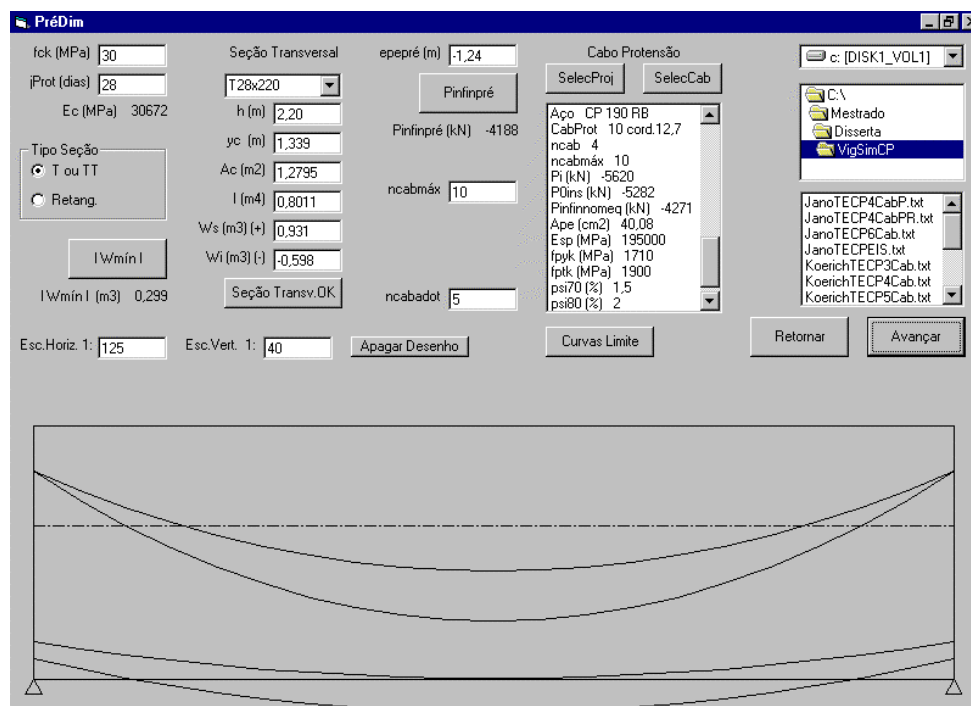


Figura 55 - Exemplo 2 - Fornecimento da seção transversal, escolha dos cabos de protensão e determinação das curvas limite (4 cabos)

Na Figura 56 (tela Cabos), pode ser visualizado o lançamento dos cabos individuais e o desenho e as características geométricas do cabo equivalente.

- O cabo 1 tem traçado retilíneo a 10 cm da face inferior da viga.
- Os cabos 2,3 e 4 (de baixo para cima) têm traçado parabólico-retilíneo.
- O cabo equivalente é mostrado em traço azul.

Na Figura 57 (tela Perdas), foram determinadas as perdas de protensão. No desenho, a partir de cima, pode-se ver:

- 1ª curva; força de protensão descontadas as perdas por atrito.
- 2ª curva; força de protensão descontadas as perdas por atrito e as perdas por cravação.
- 3ª curva; força de protensão descontadas as perdas por atrito, as perdas por cravação e as perdas elásticas.
- 4ª curva (última); valores finais da força de protensão, ou seja, após a ocorrência de todas as perdas (atrito, cravação, elásticas e progressivas).

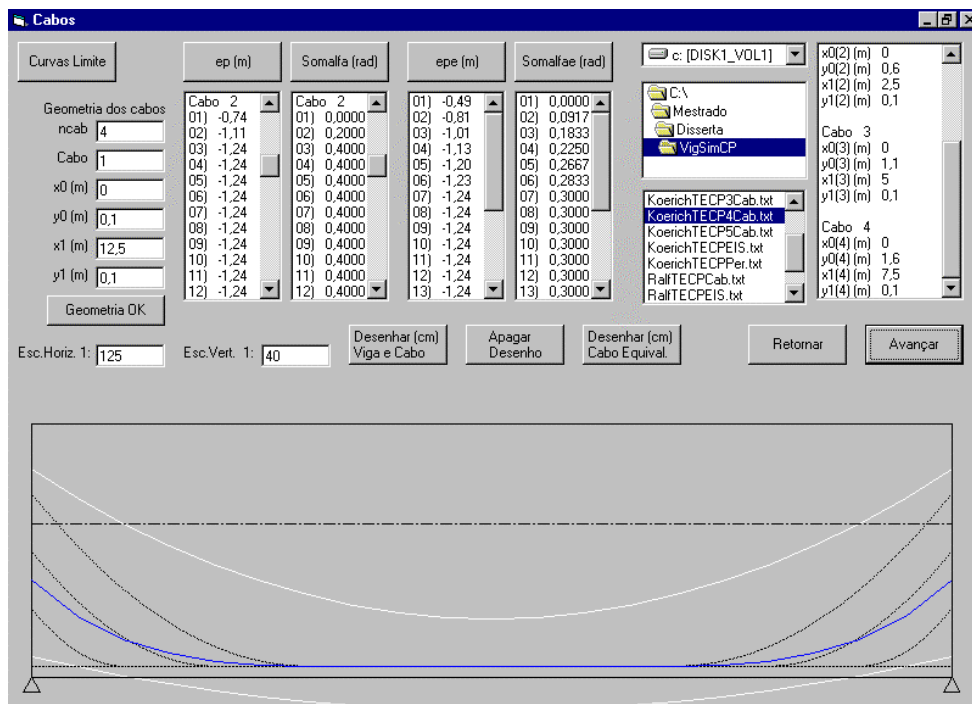


Figura 56 - Exemplo 2 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente (4 cabos)

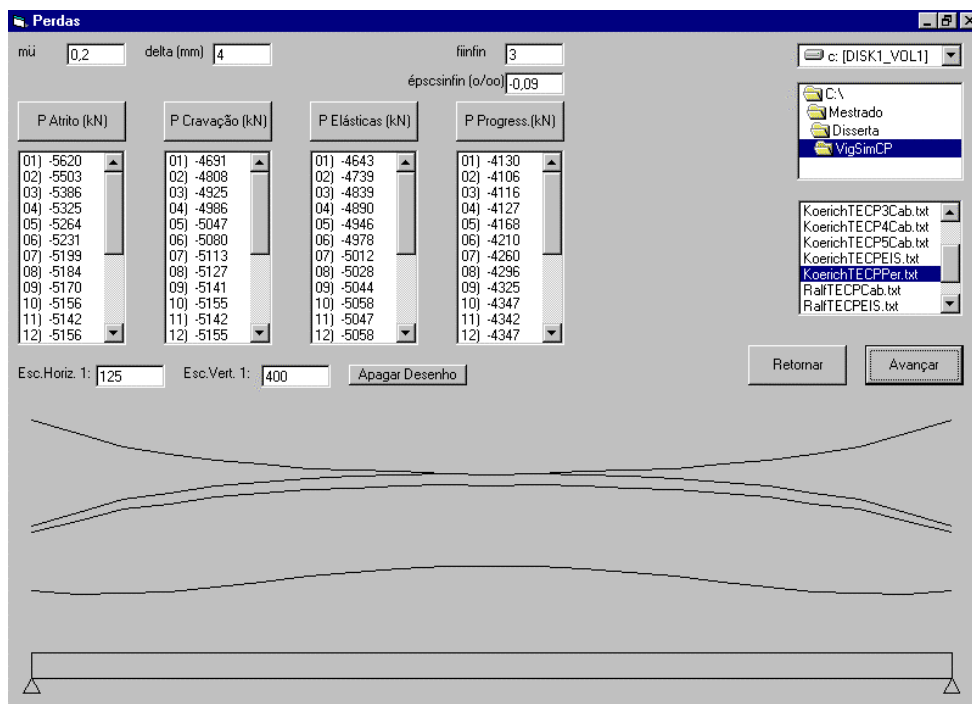


Figura 57 - Exemplo 2 - Determinação das perdas de protensão (4 cabos)

Observações com relação às perdas de protensão:

1. As perdas totais na força de protensão ($\Delta P_{\text{máx}}$) chegaram a 26,9 %.
2. A perda na força de protensão na seção do meio do vão, devido ao atrito entre o cabo e a bainha, foi de 8,5%.
3. A perda máxima na força de protensão por encurtamento elástico do concreto, devido à protensão não simultânea de todos os cabos, ocorreu na seção do meio do vão, onde atingiu 1,7%.
4. A força de protensão final ao longo da viga tem uma variação máxima de 5,5%.

Na Figura 58 (tela VerifTens), onde estão resumidas as principais características da viga analisada e as tensões nas bordas para os carregamentos e para as combinações de ações, observa-se:

- As tensões nas bordas atendem às tensões limite correspondentes às combinações de ações consideradas com alguma margem de folga. Isto não causa surpresa, uma vez que o cabo equivalente também guarda um bom afastamento das curvas limite, como se pode observar na Figura 56.

Na Tabela 6, fica evidente que a solução 2 proporcionou considerável economia de material e trabalho de protensão.

Tabela 6 - Comparação de resultados de duas soluções para o exemplo 2

Solução 1 (5 cabos de 12 cord. 12,7mm CP190RB)	Solução 2 (4 cabos de 10 cord. 12,7mm CP190RB)
$A_{pe} = 60,1 \text{ cm}^2$	$A_{pe} = 40,1 \text{ cm}^2$
$P_i = 8430 \text{ kN}$	$P_i = 5620 \text{ kN}$
$\Delta P_{\text{máx}} = 32,7 \%$	$\Delta P_{\text{máx}} = 26,9 \%$

Constata-se, pois, que com o programa computacional e pouco trabalho adicional, várias soluções para um mesmo problema puderam ser analisadas, gerando considerável economia de recursos.

VerifTens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Retornar

Seç.Transv. T28x220
l (m) 25
Protensão completa g1 (kN/m) 32
fck (MPa) 30 g2 (kN/m) 13
Ec (MPa) 30672 q (kN/m) 65

Ac (m2) 1,2795
l (m4) 0,8011
Ws (m3) 0,931
Wl (m3) -0,598

Aço CP 190 RB
CabProt 10 cord.12,7
ncab 4
Ape (cm2) 40,08
Pi (kN) -5620

Esp (MPa) 195000
SigmaELSC (MPa) -21,0 / -18,0
SigmaELSF (MPa) 2,4
SigmaELSD (MPa) 0

Seção	Item	Valor	SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSigmal (MPa)	
Seção 01	epe (m)	-0,49					
	P0 (kN)	-4643	-1,2	-1,2	-7,4	-7,4	
	Protensão	Mg1 (kN.m)	0	0,0	-1,2	0,0	-7,4
		Mg2 (kN.m)	0	0,0	-1,2	0,0	-7,4
	Final Constr.	0,5Prog. (kN)	256	0,1	-1,1	0,4	-7,0
		1,0Mq (kN.m)	0	0,0	-1,1	0,0	-7,0
	Comb.Rara	0,5Prog. (kN)	256	0,1	-1,1	0,4	-6,6
0,4Mq (kN.m)		0	0,0	-1,1	0,0	-7,0	
0,5Prog. (kN)		256	0,1	-1,1	0,4	-6,6	
Seção 02	epe (m)	-0,81					
	P0 (kN)	-4739	0,4	0,4	-10,1	-10,1	
	Protensão	Mg1 (kN.m)	475	-0,5	-0,1	0,8	-9,3
		Mg2 (kN.m)	193	-0,2	-0,3	0,3	-9,0
	Final Constr.	0,5Prog. (kN)	317	0,0	-0,3	0,7	-8,3
		1,0Mq (kN.m)	965	-1,0	-1,4	1,6	-6,7
	Comb.Rara	0,5Prog. (kN)	317	0,0	-1,4	0,7	-6,0
0,4Mq (kN.m)		386	-0,4	-0,8	0,6	-7,7	
0,5Prog. (kN)		317	0,0	-0,8	0,7	-7,0	
Seção 03	epe (m)	-1,01					

(a)

VerifTens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Retornar

Seç.Transv. T28x220
l (m) 25
Protensão completa g1 (kN/m) 32
fck (MPa) 30 g2 (kN/m) 13
Ec (MPa) 30672 q (kN/m) 65

Ac (m2) 1,2795
l (m4) 0,8011
Ws (m3) 0,931
Wl (m3) -0,598

Aço CP 190 RB
CabProt 10 cord.12,7
ncab 4
Ape (cm2) 40,08
Pi (kN) -5620

Esp (MPa) 195000
SigmaELSC (MPa) -21,0 / -18,0
SigmaELSF (MPa) 2,4
SigmaELSD (MPa) 0

Seção	Item	Valor	SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSigmal (MPa)	
Seção 10	epe (m)	-1,24					
	P0 (kN)	-5058	2,8	2,8	-14,4	-14,4	
	Protensão	Mg1 (kN.m)	2475	-2,7	0,1	4,1	-10,3
		Mg2 (kN.m)	1005	-1,1	-1,0	1,7	-8,6
	Final Constr.	0,5Prog. (kN)	356	-0,2	-1,2	1,0	-7,6
		1,0Mq (kN.m)	5027	-5,4	-6,6	8,4	0,8
	Comb.Rara	0,5Prog. (kN)	356	-0,2	-6,8	1,0	1,8
0,4Mq (kN.m)		2011	-2,2	-3,3	3,4	-4,2	
0,5Prog. (kN)		356	-0,2	-3,5	1,0	-3,2	
Seção 11	epe (m)	-1,24					
	P0 (kN)	-5047	2,8	2,8	-14,4	-14,4	
	Protensão	Mg1 (kN.m)	2500	-2,7	0,1	4,2	-10,2
		Mg2 (kN.m)	1016	-1,1	-1,0	1,7	-8,5
	Final Constr.	0,5Prog. (kN)	352	-0,2	-1,2	1,0	-7,5
		1,0Mq (kN.m)	5078	-5,5	-6,7	8,5	1,0
	Comb.Rara	0,5Prog. (kN)	352	-0,2	-6,8	1,0	2,0
0,4Mq (kN.m)		2031	-2,2	-3,4	3,4	-4,1	
0,5Prog. (kN)		352	-0,2	-3,6	1,0	-3,1	

(b)

**Figura 58 - Exemplo 2 - Tabelas de verificação de tensões de serviço
(4 cabos): (a) seções 01 e 02; (b) seções 10 e 11.**

4.3 Exemplo 3

Este exemplo também foi originalmente resolvido e apresentado por um aluno do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC ao cursar a disciplina Tópicos Especiais de Concreto Protendido em 2002.

O exemplo trata de uma viga de concreto protendido de 16 m de vão e pertence a um pavimento de uma edificação que servirá para depósito de mercadorias de supermercado. A seção transversal é do tipo I conforme mostrado na Figura 59.

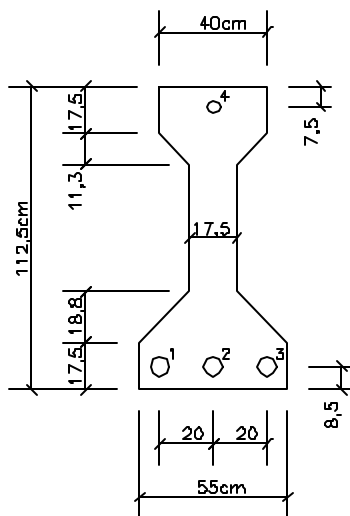


Figura 59 - Exemplo 3 - Esquema da seção transversal da viga

A posição das bainhas mostradas na Figura 59 corresponde à seção do meio do vão. As bainhas 1,2 e 3 possuem diâmetro externo $\phi_e = 7$ cm e a bainha 4 $\phi_e = 5$ cm.

- Solução 1 (6 cabos)

A solução proposta pelo autor do exemplo considera 2 tipos de cabos de protensão. As bainhas 1 e 3 conteriam 12 cordoalhas de 12,7mm e as bainhas 2 e 4 conteriam 6 cordoalhas de 12,7mm. Como os cabos a serem fornecidos

ao programa computacional deverão ser todos iguais, para as bainhas 1 e 3 serão fornecidos, para cada bainha, 2 cabos de 6 cordoalhas de 12,7mm ao invés de 1 cabo com 12 cordoalhas de 12,7mm.

A viga será discretizada em trechos de 1 m de comprimento, portanto 16 trechos e conseqüentemente 17 seções (Figura 60).

Os carregamentos e os esforços internos solicitantes nas seções consideradas também constam na Figura 60.

Como a edificação se situa em região de clima marinho com umidade ambiente $U = 75\%$, de acordo com a Tabela 2, fica definida a classe de agressividade ambiental igual a III. Definida a classe de agressividade ambiental III e tratando-se de uma viga pós-tracionada, determina-se, na Tabela 3, o nível de protensão mínimo que, neste caso, é a protensão limitada, e que será informado na tela EIS (Figura 60). Ainda de acordo com a Tabela 3, para o nível de protensão limitada, determinam-se as combinações de ações que devem ser consideradas e os estados limites de serviço que devem ser atendidos. Para a combinação freqüente deve ser atendido o estado limite de serviço de formação de fissuras (ELS-F) e para a combinação quase-permanente deve ser atendido o estado limite de descompressão (ELS-D).

Os fatores de redução para cargas acidentais de edifícios (Tabela 4) a serem considerados para as combinações freqüente e quase-permanente são, $\psi_1 = 0,6$ e $\psi_2 = 0,4$ respectivamente (Figura 60).

Será utilizado um concreto estrutural de resistência característica de 35 MPa e a protensão da viga será feita aos 28 dias de idade do concreto. O módulo de elasticidade inicial do concreto, decorrente da informação destes valores, consta no alto à esquerda na tela PréDim da Figura 61.

Considerando para o concreto aplicado na obra um abatimento $s = 6\text{cm}$, sendo a umidade ambiente $U = 75\%$, e considerada a geometria da seção transversal

da viga (Figura 59), obteve-se o valor final da deformação específica por retração do concreto $\varepsilon_{cs, \infty} = -0,10$ o/oo.

Levando em conta a idade do concreto por ocasião da protensão, o abatimento do concreto, a umidade ambiente e as características geométricas da seção transversal, foi determinado o valor final do coeficiente de fluência do concreto $\Phi_{\infty} = 2,3$.

O tipo de seção transversal da viga influi na determinação da resistência do concreto à tração na flexão. Para a viga I deste exemplo (Figura 59), foi informado o tipo de seção transversal retangular, já que são previstos apenas dois tipos de seção transversal pela NBR 6118:2001 para este fim, conforme se pode ver na Figura 61.

Determinado o módulo de resistência mínimo que deve ter a seção transversal da viga para atender à variação de tensões admissíveis para cada borda, foram fornecidas as características geométricas da seção transversal (Figura 61). Validando-se os dados da seção transversal é obtido o desenho longitudinal da viga com a indicação da posição do seu baricentro. Os fatores de escala horizontal e vertical são escolhidos de modo a se obter a representação desejada da viga.

Os cabos de protensão terão ancoragens ativas em ambas extremidades.

A excentricidade do cabo de protensão equivalente, na seção do meio do vão, foi avaliada com base na geometria da seção transversal e do posicionamento das bainhas para os cabos de protensão. Com isto pode-se pré-dimensionar o esforço de protensão na seção do meio do vão no tempo infinito (Figura 18).

Como se pretende utilizar cabos de protensão de 6 cordoalhas de 12,7mm, há que se desabilitar todas as outras opções de cabos de protensão (botão de comando SelecProj da tela PréDim).

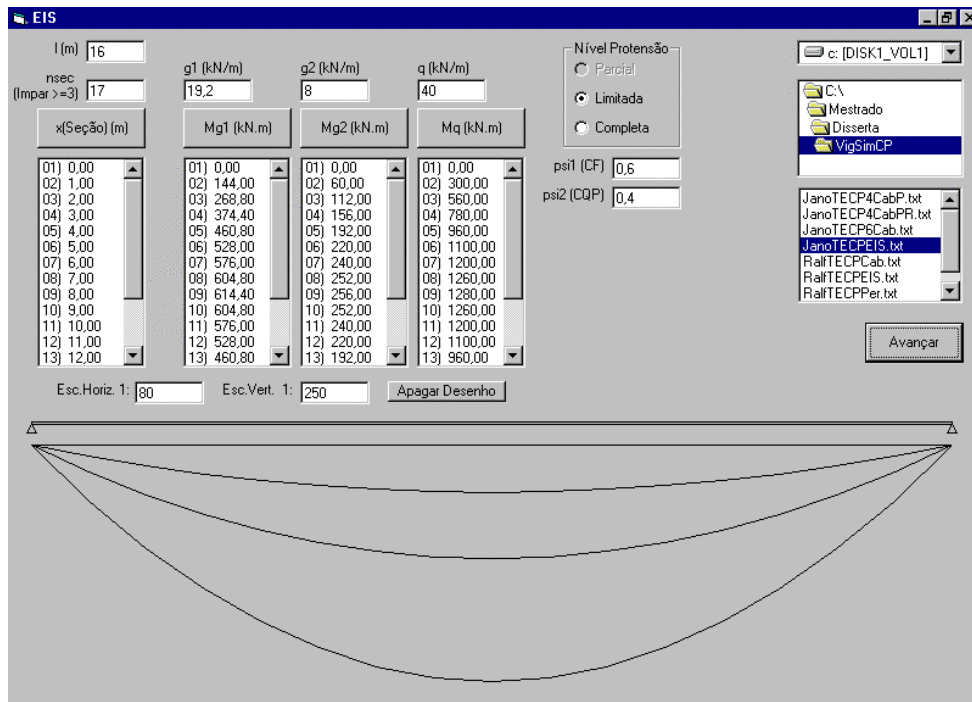


Figura 60 - Exemplo 3 - Determinação dos esforços internos solicitantes

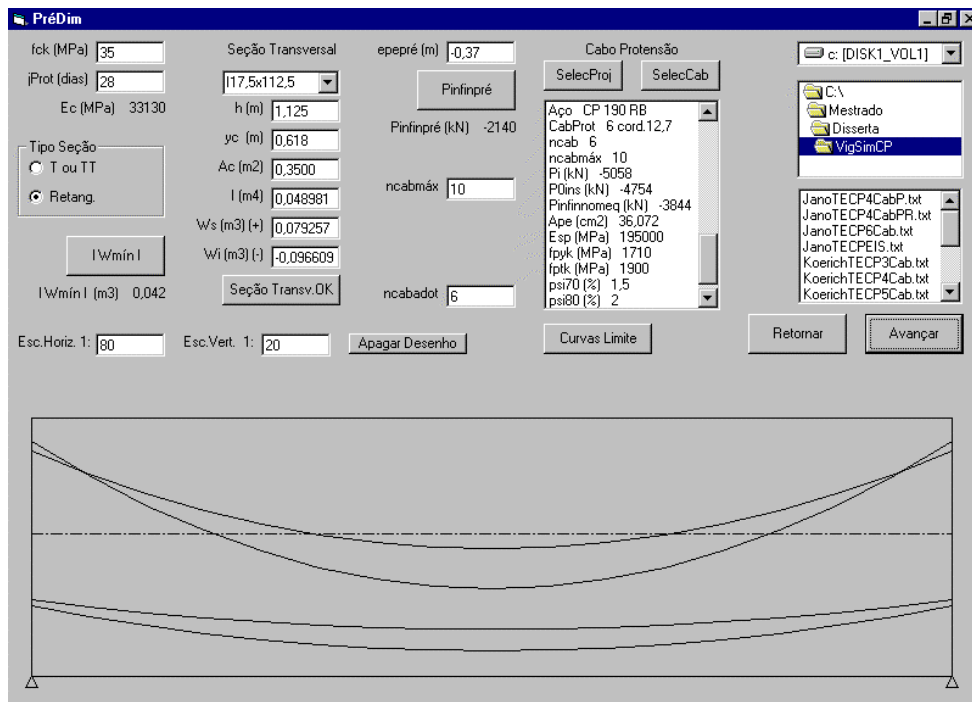


Figura 61 - Exemplo 3 - Fornecimento da seção transversal, escolha dos cabos de protensão e determinação das curvas limite

A escolha automática de cabos de protensão do programa computacional determinou 4 cabos com 6 cordoalhas de 12,7mm. Como a solução 1 proposta pelo autor do exemplo, considera 6 cabos com 6 cordoalhas de 12,7mm, foi informado para o número de cabos a adotar, $n_{\text{cabado}} = 6$. Detalhes para esta solução de 6 cabos podem ser visualizados na tela PréDim, acima do botão de comando Curvas Limite na Figura 61.

Definidos os cabos de protensão, foram determinadas e desenhadas as curvas limite. As curvas limite correspondentes à solução com 6 cabos, são a 1ª e a 3ª curvas a partir de cima (parte central) da Figura 61. Estas curvas também podem ser vistas na Figura 62. As curvas limite correspondentes à solução da escolha automática de cabos feita pelo programa (4 cabos), são a 2ª e a 4ª curvas a partir de cima na Figura 61 e podem ser vistas também na Figura 65).

É interessante observar que a curva da posição limite inferior do cabo de protensão equivalente, referente à solução com 6 cabos, está bastante afastada da borda inferior da viga. Esta situação praticamente exige que se coloquem cabos de protensão junto à face superior da viga, de forma a elevar o trajeto do cabo equivalente.

Definidas as curvas limite, pode-se passar ao lançamento dos cabos de protensão. Estes foram lançados seguindo a proposta original do autor do exemplo. As bainhas 1 e 3 contêm 2 cabos de 6 cordoalhas de 12,7mm cada uma. Estes 4 cabos têm traçado retilíneo. A bainha 2 contém 1 cabo de traçado parabólico-retilíneo e a bainha 4, 1 cabo de traçado retilíneo. Detalhes e o desenho dos cabos podem ser vistos nas Figuras 59 e 62.

Lançados os cabos individuais e determinadas suas características geométricas pode ser determinado o cabo de protensão equivalente (ver seção 3.4.2), suas características geométricas e seu desenho.

Convém observar que para a solução que está sendo adotada (número de cabos e lançamento dos cabos), o cabo equivalente ficou localizado muito próximo da curva da posição limite inferior, o que poderá ocasionar na borda

superior, na fase de protensão, tensões de tração elevadas (comparadas à σ_{ELS-F}).

Determinado o cabo equivalente, pode-se calcular as perdas de protensão. As perdas de protensão serão calculadas sobre o cabo equivalente.

Adotando para coeficiente de atrito aparente entre cabo e bainha $\mu = 0,25$, podem ser determinadas as perdas por atrito. Os valores da força de protensão, descontadas as perdas por atrito, podem ser vistos na tela Perdas (Figura 63), na 1ª caixa de lista a partir da esquerda. Mais abaixo nesta figura, na 1ª curva a partir de cima estão plotados os valores da força de protensão já consideradas as perdas por atrito.

Considerando um deslocamento do cabo de protensão por deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem $\delta = 6$ mm, podem ser determinadas as correspondentes perdas ao longo do cabo equivalente, nas diversas seções, como mostrado na 2ª caixa de lista a partir da esquerda na Figura 63. A plotagem destes valores, ou seja, da força de protensão no cabo já descontadas também as perdas por cravação, são mostradas na 2ª curva a partir de cima nesta mesma figura.

Devido à protensão não simultânea de todos os cabos de protensão, por ocasião da protensão de determinado cabo, ocorre um afrouxamento dos cabos já protendidos, devido ao encurtamento elástico do concreto. Os valores da força de protensão já descontadas também estas perdas elásticas são os mostrados na 3ª caixa de lista, a partir da esquerda, e plotados na 3ª curva a partir de cima na tela Perdas da Figura 63.

Vale novamente observar que estas perdas elásticas são relativamente pequenas se comparadas às outras perdas de protensão.

Tomando-se para o valor final do coeficiente de fluência do concreto $\varphi_{\infty} = 2,3$; para o valor final da deformação específica por retração do concreto $\varepsilon_{cs, \infty} = -$

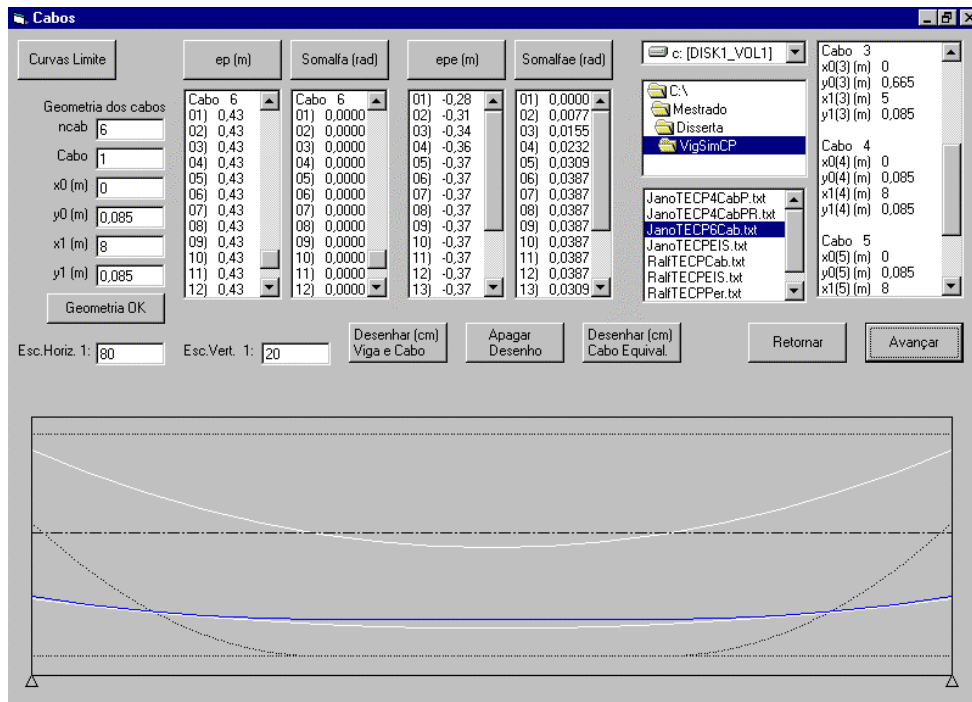


Figura 62 - Exemplo 3 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente (6 cabos)

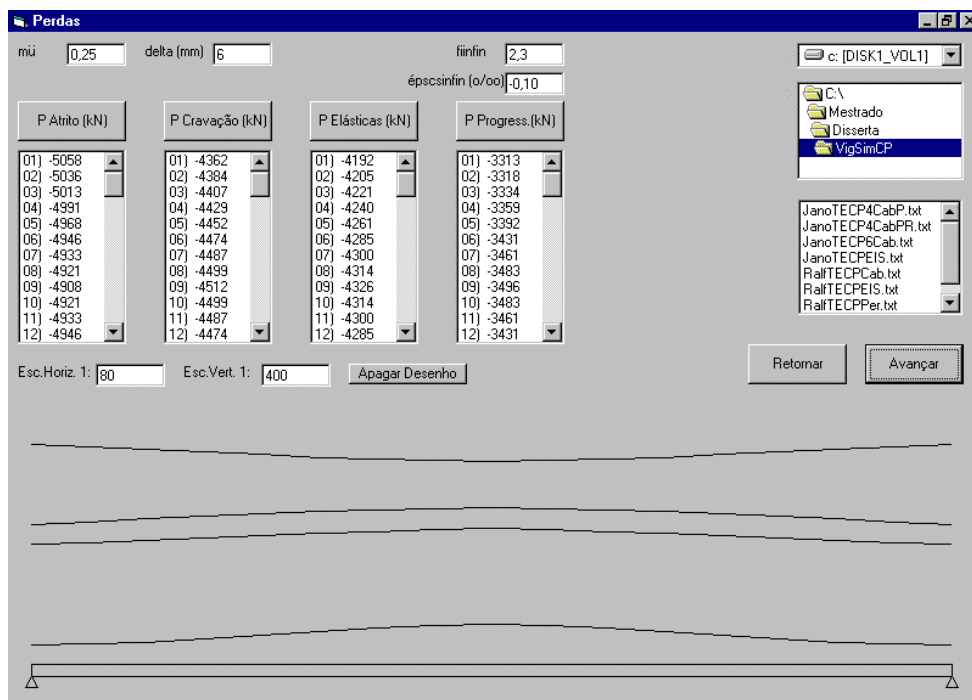


Figura 63 - Exemplo 3 - Determinação das perdas de protensão (6 cabos)

0,10 o/oo (Figura 63) e para relaxação das cordoalhas para protensão CP190RB, após 1000h, a 20°C, para 70% e 80% da carga de ruptura, $\psi_{70} = 1,5\%$ e $\psi_{80} = 2\%$ respectivamente, foram determinadas as perdas progressivas.

As perdas progressivas incluem as perdas por retração do concreto, as perdas por fluência do concreto e as perdas por relaxação da armadura de protensão. Os valores da força de protensão, nas diversas seções ao longo da viga, já descontadas também as perdas progressivas, são os mostrados na 4ª caixa de lista a partir da esquerda e seus valores acham-se plotados na última linha a partir de cima, no desenho da Figura 63.

Nota-se, também, nesta solução (6 cabos) deste exemplo, que as perdas progressivas variam pouco ao longo das diversas seções da viga (5,2%).

As perdas totais na força de protensão chegaram a 34,5%.

Na Figura 64, mostram-se, além das principais características da viga analisada, as tensões nas bordas superior e inferior para todos os carregamentos e em todas as seções consideradas na análise. É mostrada, também, em todas as seções, a soma das tensões tanto na borda superior como na inferior, para as diversas combinações de ações consideradas.

Apesar da proximidade do cabo de protensão equivalente da curva da posição limite inferior, como ressaltado anteriormente nesta seção, as tensões na borda superior, na fase de protensão, não excederam $\sigma_{ELS-F} = 3,4$ MPa.

Considerando, também, que, na fase de protensão, a tensão correspondente ao estado limite de serviço de compressão excessiva (σ_{ELS-CE}) pode ser aumentada de $0,6f_{ck}$ (21,0 MPa) para $0,7f_{ck}$ (24,5 MPa) como mostrado na tela VerifTens da Figura 64, no alto à direita, decorre que as tensões correspondentes aos estados limite de serviço são atendidas em todas as seções.

VerifTens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Seç.Transv. 117,5x112,5 Aço CP 190 RB
 l (m) 16 CabProt 6 cord.12,7 Esp (MPa) 195000
 Protensão limitada g1 (kN/m) 19,2 l (m4) 0,048981 ncab 6 SigmaELSC (MPa) -24,5 / -21,0
 fck (MPa) 35 g2 (kN/m) 8 Ws (m3) 0,079257 Ape (cm2) 36,072 SigmaELSF (MPa) 3,4
 Ec (MPa) 33130 q (kN/m) 40 Wl (m3) -0,096609 Pi (kN) -5058 SigmaELSD (MPa) 0

Seção	efe (m)		SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSigmal (MPa)
Seção 01	epe (m)		-0,28			
	P0 (kN)		-4192	2,6	2,6	-23,9
Protensão	Mg1 (kN.m)		0	0,0	2,6	0,0
	Mg2 (kN.m)		0	0,0	2,6	0,0
Final Constr.	0,5Prog. (kN)		439	-0,3	2,3	2,5
	0,6Mq (kN.m)		0	0,0	2,3	0,0
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)		439	-0,3	2,1	2,5
	0,4Mq (kN.m)		0	0,0	2,3	0,0
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)		439	-0,3	2,1	2,5
Seção 02	epe (m)		-0,31			
	P0 (kN)		-4205	4,4	4,4	-25,5
Protensão	Mg1 (kN.m)		144	-1,8	2,6	1,5
	Mg2 (kN.m)		60	-0,8	1,9	0,6
Final Constr.	0,5Prog. (kN)		444	-0,5	1,4	2,7
	0,6Mq (kN.m)		180	-2,3	-0,9	1,9
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)		444	-0,5	-1,3	2,7
	0,4Mq (kN.m)		120	-1,5	-0,1	1,2
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)		444	-0,5	-0,6	2,7
Seção 03	epe (m)		-0,34			

(a)

VerifTens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Seç.Transv. 117,5x112,5 Aço CP 190 RB
 l (m) 16 CabProt 6 cord.12,7 Esp (MPa) 195000
 Protensão limitada g1 (kN/m) 19,2 l (m4) 0,048981 ncab 6 SigmaELSC (MPa) -24,5 / -21,0
 fck (MPa) 35 g2 (kN/m) 8 Ws (m3) 0,079257 Ape (cm2) 36,072 SigmaELSF (MPa) 3,4
 Ec (MPa) 33130 q (kN/m) 40 Wl (m3) -0,096609 Pi (kN) -5058 SigmaELSD (MPa) 0

Seção	efe (m)		SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSigmal (MPa)
Seção 08	epe (m)		-0,37			
	P0 (kN)		-4314	7,9	7,9	-28,9
Protensão	Mg1 (kN.m)		605	-7,6	0,3	6,3
	Mg2 (kN.m)		252	-3,2	-2,9	2,6
Final Constr.	0,5Prog. (kN)		415	-0,8	-3,6	2,8
	0,6Mq (kN.m)		756	-9,5	-13,2	7,8
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)		415	-0,8	-13,9	2,8
	0,4Mq (kN.m)		504	-6,4	-10,0	5,2
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)		415	-0,8	-10,8	2,8
Seção 09	epe (m)		-0,37			
	P0 (kN)		-4326	8,0	8,0	-29,0
Protensão	Mg1 (kN.m)		614	-7,8	0,2	6,4
	Mg2 (kN.m)		256	-3,2	-3,0	2,6
Final Constr.	0,5Prog. (kN)		415	-0,8	-3,8	2,8
	0,6Mq (kN.m)		768	-9,7	-13,5	7,9
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)		415	-0,8	-14,2	2,8
	0,4Mq (kN.m)		512	-6,5	-10,3	5,3
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)		415	-0,8	-11,0	2,8

(b)

**Figura 64 - Exemplo 3 - Tabelas de verificação de tensões de serviço
(6 cabos): (a) seções 01 e 02; (b) seções 08 e 09.**

Conclui-se, portanto, que a solução analisada, ou seja, utilizando 6 cabos com 6 cordoalhas de 12,7mm, é satisfatória.

- Solução 2 (4 cabos)

Na solução 1 (anterior), foram utilizados 6 cabos de protensão com 6 cordoalhas CP190RB de 12,7mm, com um consumo total de aço de protensão $A_{pe} = 36,1 \text{ cm}^2$.

Conforme mencionado anteriormente, a escolha automática de cabos de protensão determinou 4 cabos de protensão de 6 cordoalhas CP190RB de 12,7mm, o que representa um consumo de aço de protensão $A_{pe} = 24,0 \text{ cm}^2$.

As curvas limite correspondentes à solução utilizando 4 cabos de protensão são mostradas em traço branco na tela Cabos da Figura 65. Convém observar que a região delimitada pelas curvas limite correspondentes à atual solução (4 cabos) baixou consideravelmente na parte central da viga, se comparada à região da solução anterior (6 cabos), como se pode ver nas Figuras 62 e 61. Vale notar que este deslocamento das curvas limite, viabiliza que no trecho central sejam utilizados, apenas cabos de protensão na parte inferior da viga.

Os 4 cabos de protensão foram então assim lançados. Os cabos 1 e 4 têm traçado retilíneo e ocupam as bainhas 1 e 3 da Figura 59. Os cabos 2 e 4 têm traçado parabólico e ocupam a bainha 2. O lançamento dos cabos pode ser visto nas caixas de lista e no desenho da tela Cabos da Figura 65.

Definido o traçado dos cabos individuais, podem ser obtidas as características geométricas do cabo de protensão equivalente e o seu desenho, acionando respectivamente os botões de comando φ_e , $\Sigma\alpha_e$ e Desenhar Cabo Equival da tela Cabos. A listagem destas características geométricas e o desenho do cabo equivalente também estão na Figura 65.

Na parte central da viga, pode-se observar que o cabo equivalente ficou abaixo da curva da posição limite inferior do cabo de protensão equivalente. Esta localização do cabo poderá ocasionar o surgimento de tensões de tração na borda superior, na fase de protensão, acima da tensão limite correspondente ao estado limite de formação de fissuras (ELS-F); ver fluxograma da Figura 21.

Com as características geométricas do cabo de protensão equivalente determinadas, pode-se passar ao cálculo das perdas de protensão.

Os dados para o cálculo das perdas de protensão, que ainda faltam ser fornecidos, são os mesmos que foram considerados na solução 1. Coeficiente de atrito aparente entre cabo e bainha $\mu = 0,25$, deslocamento do cabo de protensão por deslizamento da armadura na ancoragem e acomodação da ancoragem $\delta = 6$ mm, valor final do coeficiente de fluência do concreto $\varphi_{\infty} = 2,3$ e valor final da deformação específica por retração do concreto $\varepsilon_{cs,\infty} = -0,10$ o/oo.

Os valores da força de protensão, descontadas as perdas de protensão, encontram-se nas caixas de lista da tela Perdas da Figura 66. A plotagem destes valores pode ser vista no desenho abaixo das caixas de lista desta mesma figura. A 1ª curva a partir de cima corresponde à força de protensão após as perdas por atrito, a 2ª curva corresponde à força de protensão após as perdas por atrito e por cravação. A 3ª curva corresponde à força de protensão após as perdas por atrito, por cravação e por encurtamento elástico do concreto devido à protensão sucessiva dos cabos. A 4ª curva corresponde à força de protensão no cabo equivalente, descontadas as perdas por atrito, as perdas por cravação, as perdas por encurtamento elástico do concreto e as perdas progressivas. A 4ª caixa de lista a partir da esquerda e a 4ª curva a partir de cima na Figura 66, fornecem-nos, portanto, a força de protensão já consideradas todas as perdas de protensão, ou seja, a força de protensão ao longo da viga, no final da vida útil da estrutura.

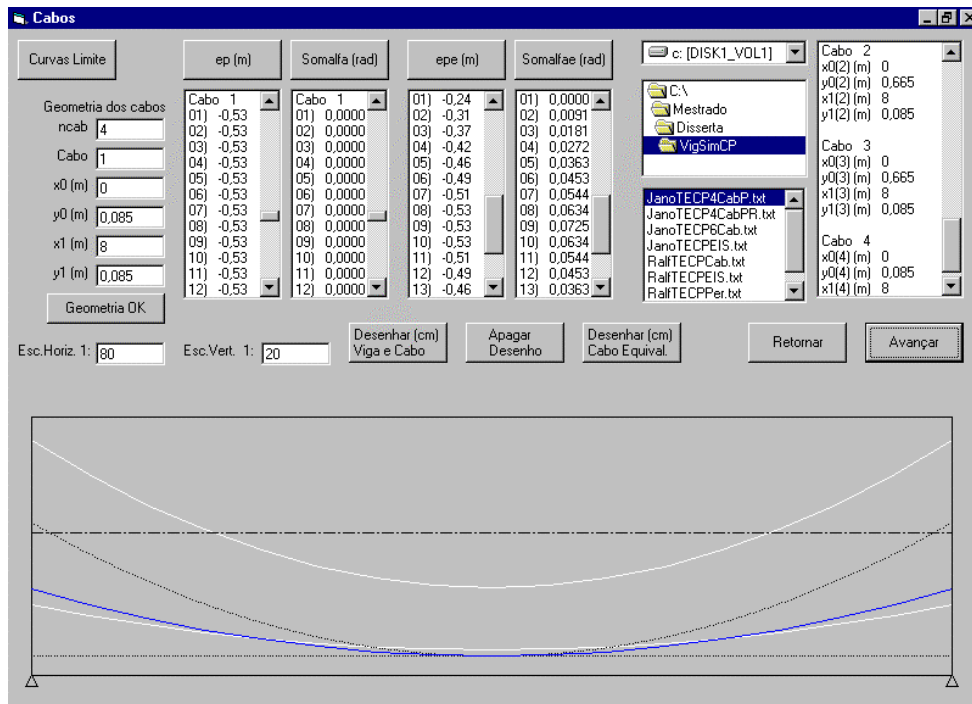


Figura 65 - Exemplo 3 - Lançamento dos cabos de protensão e determinação do cabo equivalente (4 cabos)

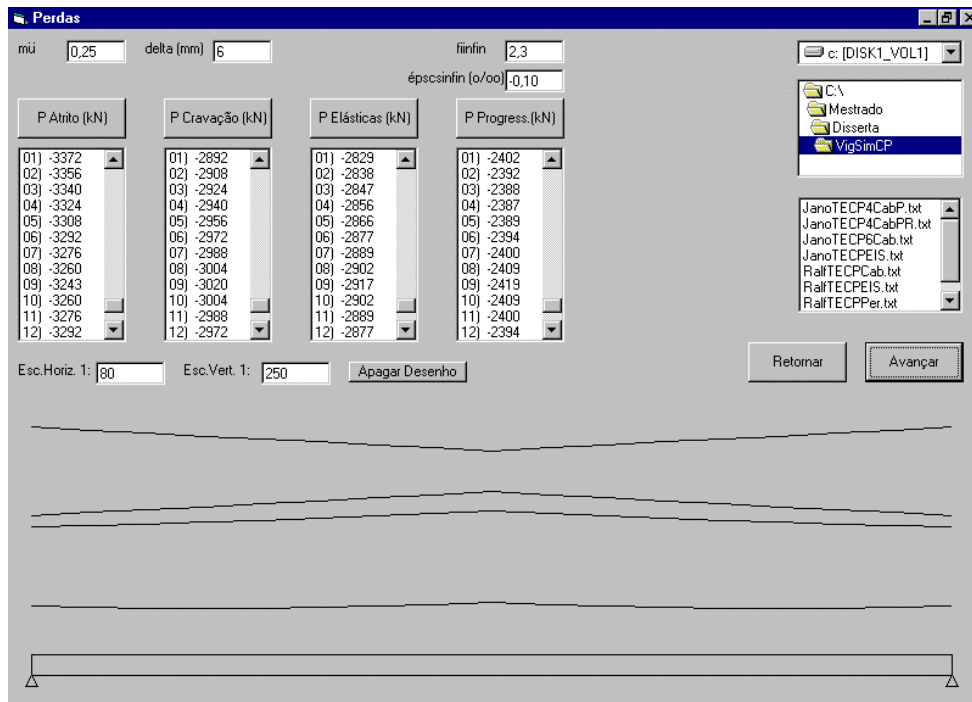


Figura 66 - Exemplo 3 - Determinação das perdas de protensão (4 cabos)

Nas curvas da força de protensão após as perdas de protensão (Figura 66) pode-se observar:

1. As perdas totais na força de protensão chegaram a 29,2%.
2. A curva da força de protensão após as perdas por atrito é linear. Uma vez que o cabo equivalente é parabólico, já que resulta da soma de 2 cabos retilíneos e 2 parabólicos, as perdas por atrito resultam lineares (ver exemplo 1, parte final).
3. As perdas por atrito são pequenas (3,8%). As perdas por atrito dependem da variação na inclinação do cabo de protensão, portanto, traçados mais próximos do retilíneo, minoram as perdas por atrito.
4. As perdas por cravação alcançaram a seção do meio do vão.
5. As perdas elásticas são pequenas relativamente às outras perdas. A seção de maior perda elástica é a do centro da viga, e nela, a perda na força de protensão por encurtamento elástico do concreto, devido à protensão sucessiva (não simultânea) dos cabos é 3,4%.
6. As perdas elásticas são maiores na parte central da viga, onde a força de protensão é maior (ver 2ª curva a partir de cima na Figura 66).
7. A força de protensão ao final da vida útil da estrutura (P_{∞}) é praticamente constante ao longo da viga (variação de 1,3%).

Na parte superior das telas VerifTens da Figura 67, constam as principais características da viga analisada. É mostrada, também, nestas telas, a soma das tensões na borda superior e inferior das seções analisadas, para as combinações de ações que devem ser consideradas.

Da análise destas tensões conclui-se que as tensões nas seções transversais da viga, atendem às tensões limite (parte superior direita da Figura 67) dos estados limites de serviço correspondentes às diversas combinações de ações.

Verif Tens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Retornar

Seq.Transv. 117,5x112,5 Aço CP 190 RB
 l (m) 16 CabProt 6 cord.12,7 Esp (MPa) 195000
 Protensão limitada g1 (kN/m) 19,2 l (m4) 0,048981 ncab 4 SigmaELSC (MPa) -24,5 / -21,0
 fck (MPa) 35 g2 (kN/m) 8 Ws (m3) 0,079257 Ape (cm2) 24,048 SigmaELSF (MPa) 3,4
 Ec (MPa) 33130 q (kN/m) 40 Wl (m3) -0,096609 Pi (kN) -3372 SigmaELSD (MPa) 0

Seção 01	epe (m)	-0,24	SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSignal (MPa)
	P0 (kN)	-2829	0,6	0,6	-15,2	-15,2
Protensão	Mg1 (kN.m)	0	0,0	0,6	0,0	-15,2
	Mg2 (kN.m)	0	0,0	0,6	0,0	-15,2
Final Constr.	0,5Prog. (kN)	214	0,0	0,5	1,1	-14,1
	0,6Mq (kN.m)	0	0,0	0,5	0,0	-14,1
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)	214	0,0	0,5	1,1	-12,9
	0,4Mq (kN.m)	0	0,0	0,5	0,0	-14,1
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)	214	0,0	0,5	1,1	-12,9
Seção 02	epe (m)	-0,31	SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSignal (MPa)
	P0 (kN)	-2838	3,0	3,0	-17,2	-17,2
Protensão	Mg1 (kN.m)	144	-1,8	1,2	1,5	-15,8
	Mg2 (kN.m)	60	-0,8	0,5	0,6	-15,1
Final Constr.	0,5Prog. (kN)	223	-0,2	0,2	1,4	-13,8
	0,6Mq (kN.m)	180	-2,3	-2,1	1,9	-11,9
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)	223	-0,2	-2,3	1,4	-10,6
	0,4Mq (kN.m)	120	-1,5	-1,3	1,2	-12,5
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)	223	-0,2	-1,5	1,4	-11,2

(a)

Verif Tens Tabela de Verificação de Tensões de Serviço

Retornar

Seq.Transv. 117,5x112,5 Aço CP 190 RB
 l (m) 16 CabProt 6 cord.12,7 Esp (MPa) 195000
 Protensão limitada g1 (kN/m) 19,2 l (m4) 0,048981 ncab 4 SigmaELSC (MPa) -24,5 / -21,0
 fck (MPa) 35 g2 (kN/m) 8 Ws (m3) 0,079257 Ape (cm2) 24,048 SigmaELSF (MPa) 3,4
 Ec (MPa) 33130 q (kN/m) 40 Wl (m3) -0,096609 Pi (kN) -3372 SigmaELSD (MPa) 0

Seção 08	epe (m)	-0,53	SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSignal (MPa)
	P0 (kN)	-2902	11,1	11,1	-24,2	-24,2
Protensão	Mg1 (kN.m)	605	-7,6	3,4	6,3	-17,9
	Mg2 (kN.m)	252	-3,2	0,2	2,6	-15,3
Final Constr.	0,5Prog. (kN)	247	-0,9	-0,7	2,1	-13,2
	0,6Mq (kN.m)	756	-9,5	-10,2	7,8	-5,4
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)	247	-0,9	-11,2	2,1	-3,4
	0,4Mq (kN.m)	504	-6,4	-7,1	5,2	-8,0
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)	247	-0,9	-8,0	2,1	-6,0
Seção 09	epe (m)	-0,53	SigmaS (MPa)	SomSigmaS (MPa)	Sigmal (MPa)	SomSignal (MPa)
	P0 (kN)	-2917	11,3	11,3	-24,4	-24,4
Protensão	Mg1 (kN.m)	614	-7,8	3,5	6,4	-18,1
	Mg2 (kN.m)	256	-3,2	0,3	2,6	-15,4
Final Constr.	0,5Prog. (kN)	249	-1,0	-0,7	2,1	-13,3
	0,6Mq (kN.m)	768	-9,7	-10,4	7,9	-5,4
Comb.Freq.	0,5Prog. (kN)	249	-1,0	-11,3	2,1	-3,3
	0,4Mq (kN.m)	512	-6,5	-7,1	5,3	-8,0
Comb.Q.Perm.	0,5Prog. (kN)	249	-1,0	-8,1	2,1	-5,9

(b)

**Figura 67 - Exemplo 3 - Tabelas de verificação de tensões de serviço
(4 cabos): (a) seções 01 e 02; (b) seções 08 e 09.**

Combinação de ações	Tensões limite para borda superior e inferior
Fase de protensão	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-F}
Final de construção	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-F}
Combinação freqüente	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-F}
Comb. quase-permanente	σ_{ELS-CE} e σ_{ELS-D}

Embora as tensões nas seções transversais da viga para as diversas combinações de ações tenham atendido às tensões limite correspondentes, observa-se que as tensões na borda superior da parte central da viga (Figura 65, seção 9, fase de protensão, $\Sigma\sigma_s$), na fase de protensão, atingiram a tensão limite correspondente (σ_{ELS-F}), como era de se esperar e conforme comentado no início da solução 2 deste exemplo.

Para que estas tensões mencionadas baixassem, poder-se-ia, por exemplo, elevar um pouco a bainha 2 correspondente aos cabos de protensão 2 e 3, na parte central da viga.

De qualquer forma, novamente foi possível constatar que com o uso desta ferramenta computacional, rapidamente e com pouco trabalho adicional, pôde-se estudar uma segunda solução para este exemplo. Obteve-se assim, além da economia de materiais já mencionada, várias conclusões úteis para outras soluções que possam vir a ser analisadas.

É interessante observar também que as curvas limite têm sido, em todos exemplos estudados, um eficiente balizamento para o lançamento dos cabos de protensão. Pode-se, pois, assim, pensar em utilizá-las como região de referência, para um lançamento automático dos cabos de protensão, numa futura implementação computacional.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como já abordado na introdução deste trabalho, programas computacionais comerciais nacionais voltados ao projeto de elementos estruturais de concreto protendido, atualmente, ainda são praticamente inexistentes. Juntamente com este trabalho, está sendo disponibilizado ao meio acadêmico e à comunidade em geral, uma ferramenta computacional para o dimensionamento de vigas simplesmente apoiadas de concreto protendido. O programa computacional desenvolvido, no estágio em que se encontra, necessita ainda de muitas melhorias, mas tem a vantagem de ser um aplicativo totalmente aberto. Estão disponibilizados neste texto os procedimentos e o código na linguagem de programação Visual Basic. O aplicativo é também uma ferramenta bastante completa, pois abrange todo o processo de análise de uma viga de concreto protendido em condições de serviço.

A seguir, apresentam-se as conclusões e recomendações deste trabalho, agrupadas por finalidades.

- Ensino, pesquisa e aplicação

Como foi possível observar nos exemplos apresentados no Capítulo 4, especialmente nas curvas da força de protensão após as perdas, o programa computacional desenvolvido é um recurso didático valioso.

Os professores da disciplina de concreto protendido podem utilizá-lo para mostrar particularidades que se observam no desenvolvimento de um projeto, como por exemplo:

- Modificação das curvas limite por alteração dos cabos de protensão utilizados
- Modificação dos valores da força de protensão após as perdas e suas respectivas curvas, por alteração do traçado dos cabos de protensão, etc.

Podem utilizá-lo também para auxiliar na correção de exercícios.

Os alunos podem utilizá-lo como diretriz, quando da elaboração do seu primeiro projeto e para analisar outras soluções.

Os pesquisadores podem utilizá-lo como ponto de partida para futuros trabalhos, ou seja, é suficiente tomar conhecimento do aplicativo desenvolvido, e implementá-lo para as necessidades da pesquisa.

A comunidade profissional de engenharia pode se valer deste programa computacional e implementá-lo para os mais diversos fins.

- Velocidade de solução de problemas

Após ter cursado a disciplina de concreto protendido, para resolver o primeiro problema de dimensionamento e detalhamento de uma viga, o aluno entre organização das informações, estudos complementares, elaboração de rotinas de programas computacionais parciais, enfim, realizar manualmente o primeiro projeto, terá de dispendir aproximadamente 25 dias de trabalho. Se fosse necessário repetir este trabalho uma segunda vez de forma manual, provavelmente dispenderia em torno de 5 dias de trabalho. Com o auxílio do programa computacional desenvolvido, terá que disponibilizar não mais do que 5 horas de trabalho.

Embora todas estas fases de aquisição do conhecimento tenham que ser trilhadas, percorridas uma vez, não se justifica que se continue repetindo esta rotina de projeto de forma manual.

Conclui-se, portanto, que, em face da atual tecnologia de hardware e software que se dispõe, não se concebe que se continue aprendendo e aplicando a técnica do concreto protendido sem uma ferramenta computacional, pelo menos com o porte da que aqui está sendo apresentada.

- Exatidão e versatilidade

Nos exemplos apresentados, ficaram confirmados os resultados que tinham sido obtidos pelos autores dos problemas. Para o exemplo 1 do Capítulo 4, além da comparação dos resultados em termos de solução, foi feita uma comparação numérica dos resultados passo a passo. Constataram-se apenas pequenas diferenças, da ordem de 0,5%, decorrentes de arredondamento de resultados. Diante disso, podemos concluir pela correção do programa computacional desenvolvido.

A utilização do aplicativo permitiu, também, com pouco trabalho adicional, que outras soluções para um mesmo problema pudessem ser analisadas. Conhecidas várias soluções para um mesmo problema, a decisão da melhor opção fica facilitada.

- Curvas limite

As curvas limite são traçadas para os cabos de protensão que foram escolhidos e/ou adotados. Estes, por sua vez, consideram uma força de protensão, baseando-se numa estimativa para as perdas de protensão na seção do meio do vão (ver item 2.4). Apesar disto, nos vários exemplos resolvidos no Capítulo 4, as expectativas com relação às curvas limite sempre se confirmaram, ou seja, o cabo de protensão equivalente deve se localizar dentro da região determinada pelas curvas limite, para que os estados limite de serviço relacionados a tensões sejam atendidos.

Desta forma, as curvas limite fornecem um balizamento para o lançamento dos cabos de protensão, de modo que se pode pensar em utilizar a região delimitada pelas curvas limite, como referência para um lançamento automático de cabos de protensão, numa futura implementação computacional.

Vale notar que os exemplos apresentados tem vãos que variam de 16m a 25m. É conveniente estudar também, se a perda admitida na força de protensão na seção do meio do vão (24%) pode ser mantida em vigas de vão maior.

- Seção transversal da viga

A rigor, ao se analisar um elemento estrutural de concreto protendido pós-tracionado, deveriam ser considerados os diversos tipos de seção transversal aplicáveis nas diversas fases da vida da estrutura. Antes da solidarização da armadura de protensão com o concreto, dever-se-ia considerar a seção transversal efetiva de concreto. Após a solidarização, seria necessário trabalhar com as propriedades geométricas da seção transversal homogeneizada.

No desenvolvimento do programa computacional, foi considerada a seção transversal bruta de concreto, em todas as fases de projeto.

Estudos com relação às diferenças que podem surgir devido à introdução desta simplificação, podem ser feitos a partir do programa apresentado. Se forem relevantes, implementações computacionais adicionais considerando estes aspectos podem ser feitas.

O cálculo das propriedades geométricas da seção transversal da viga, pelo próprio programa computacional, também pode ser incluído numa futura implementação.

Vigas de concreto protendido cuja seção transversal é alterada por concretagem complementar, requerem considerações adicionais para serem analisadas. O programa computacional apresentado pode ser implementado para o estudo de vigas com este tipo de solução.

- Retração e fluência do concreto

Para a determinação das perdas progressivas de protensão são necessários, o valor final da deformação específica por retração do concreto ($\epsilon_{cs,\infty}$) e o valor final do coeficiente de fluência do concreto (ϕ_∞). Estes valores dependem do abatimento do concreto aplicado na obra (s), da umidade ambiente (U), da idade do concreto por ocasião da protensão (j_{prot}) e da geometria da seção transversal.

Os valores de $\epsilon_{cs,\infty}$ e ϕ_∞ foram, na verdade, sempre calculados manualmente e informados ao programa, com considerável dispêndio de tempo. Fica como sugestão para futuras implementações neste aplicativo, a determinação dos valores de $\epsilon_{cs,\infty}$ e ϕ_∞ a partir dos dados básicos acima mencionados, pelo próprio programa computacional.

- Perdas progressivas

As perdas progressivas da força de protensão incluem as perdas por retração do concreto, as perdas por fluência do concreto e as perdas por relaxação da armadura de protensão.

No programa computacional desenvolvido, a determinação das perdas progressivas considera as perdas por relaxação dependentes das perdas por retração e fluência do concreto [Vasconcelos, 1980].

De acordo com o Prof. Evandro Porto Duarte [Duarte, 1995], as perdas por relaxação da armadura de protensão podem ser calculadas independentemente, considerando uma perda de tensão constante na armadura de protensão ao longo de toda a viga.

A NBR 6118:2001 - Projeto de estruturas de concreto sugere ainda uma outra maneira de calcular as perdas progressivas, também considerando um método não iterativo.

No aplicativo desenvolvido podem ser feitas implementações adicionais para comparar os resultados que se obtêm com cada um dos métodos acima sugeridos.

- Gradiente não-linear de temperatura

Mesmo em vigas isostáticas, quando o gradiente de temperatura é não-linear, como no caso de seções "T", principalmente em pontes, podem ocorrer até mesmo tensões de tração na borda inferior da viga. É, portanto, conveniente implementar também este tipo de carregamento no programa computacional para análise deste efeito.

- Flechas

É interessante também que numa implementação computacional futura seja incluído o cálculo das flechas da viga, para verificação dos Estados Limites de Serviço de Deformações Excessivas (ELS-DEF)

- Ancoragens dos cabos

O atual estágio do programa computacional prevê cabos com duas ancoragens ativas, localizadas nas faces extremas da viga. É desejável fazer implementações no programa computacional para que possam ser considerados cabos com ancoragens passivas e cabos com ancoragens ativas na face superior da viga.

- Estado Limite Último (ELU)

Conforme visto no Capítulo 3, o dimensionamento da viga às solicitações normais e tangenciais no Estado Limite Último ficou excluído no atual estágio do programa computacional. Fica este item, portanto, também como recomendação para uma futura implementação computacional.

6 ANEXOS

6.1 Código EIS

Option Explicit

```
Private EscHoriz As Single
Private EscVert As Single
```

```
Private strSeção As String
Private strxSeção As String
Private strMg1 As String
Private strMg2 As String
Private strMq As String
Private ArqCam As String
```

Private Sub cmdApagarDesenho_Click()

```
Cls
```

End Sub

Private Sub cmdAvançar_Click()

```
'Avançar formulário ou mensagens de erro.
Select Case strNívProt
Case ""
MsgBox "Informar Nível Protensão" , vbCritical, "Atenção"
Case "ProtParcial"
If psi1 = 0 Or psi2 = 0 Then
MsgBox "Informar psi1, psi2"
Else
frm1EIS.Hide
frm2PréDim.Show
End If
Case "ProtLimitada"
If psi1 = 0 Or psi2 = 0 Then
MsgBox "Informar psi1, psi2"
Else
frm1EIS.Hide
frm2PréDim.Show
End If
Case "ProtCompleta"
If psi1 = 0 Then
MsgBox "Informar psi1"
Else
frm1EIS.Hide
frm2PréDim.Show
End If
End Select
```

End Sub

Private Sub cmdMg1_Click()

```
'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
g1 = txtg1.Text
```

```
'Calculo e listagem de Mg1(Seção).
```

```
For Seção = 1 To nsec
Mg1(Seção) = (g1 * l) / 2 * x(Seção) - g1 * x(Seção) * (x(Seção) / 2)
```

```
strSeção = Format(Seção, "00")
strMg1 = Format(Mg1(Seção), "Fixed")
lstMg1.AddItem strSeção & " " & strMg1
```

```
Next
```

```
lstMg1.AddItem " "
```

```
'Plotagem de Mg1(Seção).
Line (0, 0)-(l * 100 / EscHoriz, 0)
For Seção = 1 To nsec - 1
    Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, Mg1(Seção) / EscVert)-(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz, Mg1(Seção + 1) / EscVert)
Next
```

End Sub

```
Private Sub cmdMg2_Click()
```

```
'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
g2 = txtg2.Text
```

```
'Calculo e listagem de Mg2(Seção).
For Seção = 1 To nsec
    Mg2(Seção) = (g2 * l) / 2 * x(Seção) - g2 * x(Seção) * (x(Seção) / 2)
```

```
    strSeção = Format(Seção, "00")
    strMg2 = Format(Mg2(Seção), "Fixed")
    lstMg2.AddItem strSeção & " " & strMg2
Next
lstMg2.AddItem " "
```

```
'Plotagem de Mg2(Seção).
For Seção = 1 To nsec - 1
    Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, Mg2(Seção) / EscVert)-(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz, Mg2(Seção + 1) / EscVert)
Next
```

End Sub

```
Private Sub cmdMq_Click()
```

```
'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
q = txtq.Text
```

```
'Calculo e listagem de Mq(Seção).
For Seção = 1 To nsec
    Mq(Seção) = (q * l) / 2 * x(Seção) - q * x(Seção) * (x(Seção) / 2)
```

```
    strSeção = Format(Seção, "00")
    strMq = Format(Mq(Seção), "Fixed")
    lstMq.AddItem strSeção & " " & strMq
Next
lstMq.AddItem " "
```

```
'Plotagem de Mq(Seção).
For Seção = 1 To nsec - 1
    Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, Mq(Seção) / EscVert)-(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz, Mq(Seção + 1) / EscVert)
Next
```

End Sub

```
Private Sub cmdxSeção_Click()
```

```
'Atribuição dos valores das caixas de texto as variáveis.
l = txtl.Text
nsec = txtnsec.Text
```

```
'Calculo e listagem das abcissas das seções.
For Seção = 1 To nsec
    x(Seção) = (Seção - 1) * l / (nsec - 1)
```

```
    strSeção = Format(Seção, "00")
    strxSeção = Format(x(Seção), "Fixed")
    lstxSeção.AddItem strSeção & " " & strxSeção
Next
lstxSeção.AddItem " "
```

```
'Desenho da viga.
EscHoriz = txtEscHoriz.Text
EscVert = txtEscVert.Text
```

```
Line (0, -0.5)-Step(l * 100 / EscHoriz, 0.05), , B
CurrentX = 0
CurrentY = -0.45
```

```

Line -Step(0.2 / 2, 0.2 * Sqr(3) / 2)
Line -Step(0.2, 0)
Line -Step(0.2 / 2, -0.2 * Sqr(3) / 2)
CurrentX = l * 100 / EscHoriz
CurrentY = -0.45
Line -Step(0.2 / 2, 0.2 * Sqr(3) / 2)
Line -Step(0.2, 0)
Line -Step(0.2 / 2, -0.2 * Sqr(3) / 2)

End Sub

Private Sub Dir1_Change()

    File1.Path = Dir1.Path

End Sub

Private Sub Drive1_Change()

    Dir1.Path = Drive1.Drive

End Sub

Private Sub File1_Click()

    ArqCam = File1.Path & "\" & File1.FileName

    'Atribuição dos dados do arquivo texto as variáveis.
    Open ArqCam For Input As #1
    Input #1, l
    Input #1, nsec

    Input #1, g1
    Input #1, g2
    Input #1, q

    Input #1, psi1
    Input #1, psi2

    Input #1, EscHoriz
    Input #1, EscVert

    Close #1

    'Preenchimento das caixas de texto com os valores das
    'variáveis atribuídos pelo arquivo texto.
    txtl.Text = l
    txtnsec.Text = nsec
    txtg1.Text = g1
    txtg2.Text = g2
    txtq.Text = q
    optProtLimitada.Value = True
    txtpsi1.Text = psi1
    txtpsi2.Text = psi2
    txtEscHoriz.Text = EscHoriz
    txtEscVert.Text = EscVert

End Sub

Private Sub Form_KeyPress(KeyAscii As Integer)

    If KeyAscii = vbKeyReturn Then
        SendKeys "{TAB}"
    End If

End Sub

Private Sub Form_Load()

    txtEscHoriz.Text = 100
    txtEscVert.Text = 1000

End Sub

Private Sub optProtCompleta_Click()

```

```

    strNívProt = "ProtCompleta"

    psi2 = 0
    txtpsi2.Text = psi2
    txtpsi2.Locked = True 'Bloqueia caixa de texto.

End Sub

Private Sub optProtLimitada_Click()

    strNívProt = "ProtLimitada"

    txtpsi2.Locked = False 'Desbloqueia caixa de texto.
End Sub

Private Sub optProtParcial_Click()

    strNívProt = "ProtParcial"

    txtpsi2.Locked = False 'Desbloqueia caixa de texto.

End Sub

Private Sub txtpsi1_LostFocus()

    'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
    psi1 = txtpsi1.Text

End Sub

Private Sub txtpsi2_LostFocus()

    'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
    psi2 = txtpsi2.Text

End Sub

```

6.2 Código PréDim

```

Option Explicit

'Geometria.
Private WmínCR As Single
Private WmínCF As Single
Private WmínCQP As Single
Private Wmín As Single
Private strWmín As String
Private DadoSecTransv(1 To 7, 1 To 10) As String
Private J As Integer
Private EscHoriz As Single
Private EscVert As Single
Private ArqCam As String

'Cargas.
Private Sigmalg1 As Single
Private Sigmalg2 As Single
Private Sigmalq As Single

'Concreto.
Private jProt As Integer
Private strEc As String

'Cabos.
Private epepré As Single
Private epels(50) As Single
Private epeli(50) As Single
Private PinfínCR As Single
Private PinfínCF As Single
Private PinfínCQP As Single
Private Pinfínpré As Single

```



```

Private strPinfpré As String
Private Pinfinnom As Single
Private Pinfinnomeq As Single
Private P0ins As Single
Private TipCab As Integer
Private NomCab(31) As String
Private Selec(31) As String
Private Ap(31) As Single
Private CabNec(31) As Single
Private ncabnec(31) As Integer
Private ncabmáx As Integer
Private ncabadot As Integer
Private CabSelec As Integer
Private Dif As Single

Private Sub ListDadCab()

'Listagem de dados do cabo de protensão selecionado ou adotado.
IstCabProt.AddItem "Aço " & Aço
IstCabProt.AddItem "CabProt " & CabProt
IstCabProt.AddItem "ncab " & ncab
IstCabProt.AddItem "ncabmáx " & ncabmáx
IstCabProt.AddItem "Pi (kN) " & Pi
IstCabProt.AddItem "P0ins (kN) " & P0ins
IstCabProt.AddItem "Pinfinnomeq (kN) " & Pinfinnomeq
IstCabProt.AddItem "Ape (cm2) " & Ape
IstCabProt.AddItem "Esp (MPa) " & Esp
IstCabProt.AddItem "fpyk (MPa) " & fpyk
IstCabProt.AddItem "fptk (MPa) " & fptk
IstCabProt.AddItem "psi70 (%) " & psi70
IstCabProt.AddItem "psi80 (%) " & psi80
IstCabProt.AddItem ""

End Sub

Private Sub DesVig()

'Desenho da viga e baricentro.
EscHoriz = txtEscHoriz.Text
EscVert = txtEscVert.Text

Line (0, 0) - Step(I * 100 / EscHoriz, h * 100 / EscVert), , B
CurrentX = 0
CurrentY = 0
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, -(h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)
Line -Step(-(h / 5) * 100 / EscHoriz, 0)
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, (h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)
CurrentX = I * 100 / EscHoriz
CurrentY = 0
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, -(h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)
Line -Step(-(h / 5) * 100 / EscHoriz, 0)
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, (h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)

DrawStyle = 3
Line (0, yc * 100 / EscVert) - (I * 100 / EscHoriz, yc * 100 / EscVert)
DrawStyle = 0

End Sub

Private Sub cboSecTransv_Click()

'Atribuição dos dados da seção transversal selecionada
'às caixas de texto.
For J = 1 To 10
If cboSecTransv.Text = DadoSecTransv(1, J) Then
'cboSecTransv.Text = DadoSecTransv(1, J)
txth.Text = DadoSecTransv(2, J)
txtyc.Text = DadoSecTransv(3, J)
txtAc.Text = DadoSecTransv(4, J)
txtl.Text = DadoSecTransv(5, J)
txtWs.Text = DadoSecTransv(6, J)
txtWi.Text = DadoSecTransv(7, J)
Exit For
End If
Next J

```

End Sub

Private Sub cmdApagarDesenho_Click()

Cls

End Sub

Private Sub cmdAvançar_Click()

'Mensagem de erro.

If Ec = 0 Then

MsgBox "Ec = 0"

Else

frm2PréDim.Hide

frm3Cabos.Show

End If

End Sub

Private Sub cmdSelecCab_Click()

ncabmáx = txtncabmáx.Text

'Seleção de todos cabos de protensão habilitados.

For TipCab = 1 To 31

If SelecProj(TipCab) = "Sim" Then

Selec(TipCab) = "Sim"

Else

Selec(TipCab) = "Não"

End If

Next TipCab

'Determinação de ncabnec(TipCab).

For TipCab = 1 To 31

If Selec(TipCab) = "Sim" Then

CabNec(TipCab) = Abs(Pinfinpré) / (0.76 * ((0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap(TipCab) * 10 ^ 4)))

If Int(CabNec(TipCab)) = CabNec(TipCab) Then

ncabnec(TipCab) = Int(CabNec(TipCab))

Else

ncabnec(TipCab) = Int(CabNec(TipCab)) + 1

End If

If ncabnec(TipCab) > ncabmáx Then

Selec(TipCab) = "Não"

End If

End If

Next TipCab

'Escolha do cabo de menor área possível.

CabSelec = 0

Dif = 1

For TipCab = 1 To 31

If Selec(TipCab) = "Sim" Then

If (ncabnec(TipCab) - CabNec(TipCab)) < Dif Then

Dif = ncabnec(TipCab) - CabNec(TipCab)

CabSelec = TipCab

End If

End If

Next TipCab

'Cálculo e/ou atribuição e listagem de dados do cabo o

'de protensão selecionado.

If CabSelec = 0 Then

CabProt = "Nenhum"

ncab = CabSelec

Pi = (-1) * Int((0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap(CabSelec) * 10 ^ 4) * ncab)

P0ins = (-1) * Int(0.94 * (0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap(CabSelec) * 10 ^ 4) * ncab)

Pinfinnomeq = (-1) * Int(0.76 * (0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap(CabSelec) * 10 ^ 4) * ncab)

Ape = Ap(CabSelec) * ncab

Call ListDadCab

Else

CabProt = NomCab(CabSelec)

ncab = ncabnec(CabSelec)

Pi = (-1) * Int((0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap(CabSelec) * 10 ^ 4) * ncab)

P0ins = (-1) * Int(0.94 * (0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap(CabSelec) * 10 ^ 4) * ncab)

```

Pinfinnomeq = (-1) * Int(0.76 * (0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap/CabSelec) * 10 ^ -4) * ncab
Ape = Ap(CabSelec) * ncab

Call ListDadCab
End If

End Sub

Private Sub cmdCurvasLimite_Click()

'Cálculo das curvas limite.
Select Case strNívProt
Case "ProtParcial"
For Seção = 1 To nsec
epels(Seção) = (SigmaELSF - ((-1) * (Mg1(Seção) / Wi) * 10 ^ -3) - ((-1) * (Mg2(Seção) / Wi) * 10 ^ -3) - (psi1 * (-1) * (Mq(Seção) / Wi) * 10 ^ -3) - ((Pinfinnomeq / Ac) * 10 ^ -3)) / (((-1) * Pinfinnomeq / Wi) * 10 ^ -3) 'CF, ELS-F
epeli(Seção) = (SigmaELSF - ((-1) * (Mg1(Seção) / Ws) * 10 ^ -3) - ((P0ins / Ac) * 10 ^ -3)) / (((-1) * (P0ins) / Ws) * 10 ^ -3) 'P0+g1, ELS-F
Next Seção
Case "ProtLimitada"
For Seção = 1 To nsec
epels(Seção) = (SigmaELSF - ((-1) * (Mg1(Seção) / Wi) * 10 ^ -3) - ((-1) * (Mg2(Seção) / Wi) * 10 ^ -3) - (psi1 * (-1) * (Mq(Seção) / Wi) * 10 ^ -3) - ((Pinfinnomeq / Ac) * 10 ^ -3)) / (((-1) * Pinfinnomeq / Wi) * 10 ^ -3) 'CF, ELS-F
epeli(Seção) = (SigmaELSF - ((-1) * (Mg1(Seção) / Ws) * 10 ^ -3) - ((P0ins / Ac) * 10 ^ -3)) / (((-1) * (P0ins) / Ws) * 10 ^ -3) 'P0+g1, ELS-F
Next Seção
Case "ProtCompleta"
For Seção = 1 To nsec
epels(Seção) = (0 - ((-1) * (Mg1(Seção) / Wi) * 10 ^ -3) - ((-1) * (Mg2(Seção) / Wi) * 10 ^ -3) - (psi1 * (-1) * (Mq(Seção) / Wi) * 10 ^ -3) - ((Pinfinnomeq / Ac) * 10 ^ -3)) / (((-1) * Pinfinnomeq / Wi) * 10 ^ -3) 'CF, ELS-D
epeli(Seção) = (SigmaELSF - ((-1) * (Mg1(Seção) / Ws) * 10 ^ -3) - ((P0ins / Ac) * 10 ^ -3)) / (((-1) * (P0ins) / Ws) * 10 ^ -3) 'P0+g1, ELS-F
Next Seção
End Select

'Desenho da viga e baricentro.
'Call frm3Cabos.DesVig
Call DesVig

'Desenho das curvas limite.
For Seção = 1 To nsec
yls(Seção) = yc + epels(Seção)
yli(Seção) = yc + epeli(Seção)
Next
For Seção = 1 To nsec - 1
Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, yls(Seção) * 100 / EscVert)-(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz, yls(Seção + 1) * 100 / EscVert)
Next
For Seção = 1 To nsec - 1
Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, yli(Seção) * 100 / EscVert)-(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz, yli(Seção + 1) * 100 / EscVert)
Next
End Sub

Private Sub cmdSecTransvOK_Click()

'Atribuição dos valores das caixas de texto às variáveis.
SecTransv = cboSecTransv.Text
h = txth.Text
yc = txtyc.Text
Ac = txtAc.Text
I = txtI.Text
Ws = txtWs.Text
Wi = txtWi.Text

'Desenho da viga e baricentro.
Call DesVig

End Sub

Private Sub cmdPinfinpré_Click()

'Mensagem de erro.

```

```

If SigmaELSF = 0 Then
    MsgBox "Informar Tipo Seção" , vbCritical, "Atenção"
End If

'Atribuição do valor da caixa de texto a variável.
epepré = txtepepré.Text

'Cálculo de Pinfinpré.
Sigma1 = (-1) * (Mg1(nsec / 2 + 0.5) / Wi) * 10 ^ -3
Sigma2 = (-1) * (Mg2(nsec / 2 + 0.5) / Wi) * 10 ^ -3
Sigma1q = (-1) * (Mq(nsec / 2 + 0.5) / Wi) * 10 ^ -3
Select Case strNívProt
    Case "ProtParcial"
        PinfinCF = (SigmaELSF * 10 ^ 3 - Sigma1 * 10 ^ 3 - Sigma2 * 10 ^ 3 - psi1 * Sigma1q * 10 ^ 3) / (1 / Ac + (-1)
        * ((-1) * epepré) / Wi) 'CF, ELS-W !Adotado SigmaELSF
        PinfinCQP = (SigmaELSF * 10 ^ 3 - Sigma1 * 10 ^ 3 - Sigma2 * 10 ^ 3 - psi2 * Sigma1q * 10 ^ 3) / (1 / Ac + (
        1) * ((-1) * epepré) / Wi) 'CQP, ELS-F
        If Abs(PinfinCF) >= Abs(PinfinCQP) Then
            Pinfinpré = PinfinCF
        Else
            Pinfinpré = PinfinCQP
        End If
    Case "ProtLimitada"
        PinfinCF = (SigmaELSF * 10 ^ 3 - Sigma1 * 10 ^ 3 - Sigma2 * 10 ^ 3 - psi1 * Sigma1q * 10 ^ 3) / (1 / Ac + (-1)
        * ((-1) * epepré) / Wi) 'CF, ELS-F
        PinfinCQP = (0 - Sigma1 * 10 ^ 3 - Sigma2 * 10 ^ 3 - psi2 * Sigma1q * 10 ^ 3) / (1 / Ac + (-1) * ((-1) * epepré) /
        Wi) 'CQP, ELS-D
        If Abs(PinfinCF) >= Abs(PinfinCQP) Then
            Pinfinpré = PinfinCF
        Else
            Pinfinpré = PinfinCQP
        End If
    Case "ProtCompleta"
        PinfinCR = (SigmaELSF * 10 ^ 3 - Sigma1 * 10 ^ 3 - Sigma2 * 10 ^ 3 - 1 * Sigma1q * 10 ^ 3) / (1 / Ac + (-1) *
        ((-1) * epepré) / Wi) 'CR, ELS-F
        PinfinCF = (0 - Sigma1 * 10 ^ 3 - Sigma2 * 10 ^ 3 - psi1 * Sigma1q * 10 ^ 3) / (1 / Ac + (-1) * ((-1) * epepré) /
        Wi) 'CF, ELS-D
        If Abs(PinfinCR) >= Abs(PinfinCF) Then
            Pinfinpré = PinfinCR
        Else
            Pinfinpré = PinfinCF
        End If
End Select

'Impressão de Pinfinpré no formulário.
strPinfinpré = Format(Pinfinpré, "####0")
lblPinfinpré.Caption = "Pinfinpré (kN) " & strPinfinpré

End Sub

Private Sub cmdRetornar_Click()

    frm2PréDim.Hide
    frm1EIS.Show

End Sub

Private Sub cmdSelecProj_Click()

    frm2PréDimCab.Show

End Sub

Private Sub cmdWmín_Click()

    'Mensagem de erro.
    If SigmaELSF = 0 Then
        MsgBox "Informar Tipo Seção" , vbCritical, "Atenção"
    End If

    'Calculo de Wmín.
    Select Case strNívProt
        Case "ProtParcial"
            WmínCF = (Mg2(nsec / 2 + 0.5) + psi1 * Mq(nsec / 2 + 0.5)) / (SigmaELSF * 10 ^ 3 - SigmaELSCE * 10 ^ 3)
            'CF, ELS-W -> ELS-CE !Adotado SigmaELSF -> SigmaELSCE

```

```

        WmínCQP = (Mg2(nsec / 2 + 0.5) + psi2 * Mq(nsec / 2 + 0.5)) / (SigmaELSF * 10 ^ 3 - SigmaELSCE * 10 ^ 3)
'CQP, ELS-F -> ELS-CE
    If WmínCF >= WmínCQP Then
        Wmín = WmínCF
    Else
        Wmín = WmínCQP
    End If
    Case "ProtLimitada"
        WmínCF = (Mg2(nsec / 2 + 0.5) + psi1 * Mq(nsec / 2 + 0.5)) / (SigmaELSF * 10 ^ 3 - SigmaELSCE * 10 ^ 3)
'CF, ELS-F -> ELS-CE
        WmínCQP = (Mg2(nsec / 2 + 0.5) + psi2 * Mq(nsec / 2 + 0.5)) / (SigmaELSD * 10 ^ 3 - SigmaELSCE * 10 ^ 3)
'CQP, ELS-D -> ELS-CE
        If WmínCF >= WmínCQP Then
            Wmín = WmínCF
        Else
            Wmín = WmínCQP
        End If
        Case "ProtCompleta"
            WmínCR = (Mg2(nsec / 2 + 0.5) + 1 * Mq(nsec / 2 + 0.5)) / (SigmaELSF * 10 ^ 3 - SigmaELSCE * 10 ^ 3) 'CR,
ELS-F -> ELS-CE
            WmínCF = (Mg2(nsec / 2 + 0.5) + psi1 * Mq(nsec / 2 + 0.5)) / (SigmaELSD * 10 ^ 3 - SigmaELSCE * 10 ^ 3)
'CF, ELS-D -> ELS-CE
            If WmínCR >= WmínCF Then
                Wmín = WmínCR
            Else
                Wmín = WmínCF
            End If
        End Select

    'Impressão de Wmín no formulário.
    strWmín = Format(Wmín, "#0.000")
    lblWmín.Caption = "l Wmín l (m3) " & strWmín

End Sub

Private Sub Dir1_Change()

    File1.Path = Dir1.Path

End Sub

Private Sub Drive1_Change()

    Dir1.Path = Drive1.Drive

End Sub

Private Sub File1_Click()

    ArqCam = File1.Path & "\" & File1.FileName

    'Atribuição dos dados do arquivo texto as variáveis.
    Open ArqCam For Input As #1

    Input #1, fck
    Input #1, Ec
    Input #1, SigmaELSCE
    Input #1, SigmaELSD
    Input #1, SigmaELSF

    Input #1, SecTransv
    Input #1, h
    Input #1, yc
    Input #1, Ac
    Input #1, l
    Input #1, Ws
    Input #1, Wi

    Input #1, epepré

    Input #1, Aço
    Input #1, CabProt
    Input #1, ncab
    Input #1, Pi
    Input #1, P0ins
    Input #1, Pinfinnomeq

```

```
Input #1, Ape
Input #1, Esp
Input #1, fptk
Input #1, psi70
Input #1, psi80
```

```
Close #1
```

```
'Preenchimento das caixas de texto com os valores das
'variáveis atribuídos pelo arquivo texto.
```

```
txtfck.Text = fck
lblEc.Caption = "Ec (MPa) " & Ec
```

```
cboSecTransv.Text = SecTransv
txth.Text = h
txtyc.Text = yc
txtAc.Text = Ac
txtl.Text = l
txtWs.Text = Ws
txtWi.Text = Wi
```

```
txtepepré.Text = epepré
```

```
IstCabProt.AddItem "Aço " & Aço
IstCabProt.AddItem "CabProt " & CabProt
IstCabProt.AddItem "ncab " & ncab
IstCabProt.AddItem "Pi (kN) " & Pi
IstCabProt.AddItem "P0ins (kN) " & P0ins
IstCabProt.AddItem "Pinfinnomeq (kN) " & Pinfinnomeq
IstCabProt.AddItem "Ape (cm2) " & Ape
IstCabProt.AddItem "Esp (MPa) " & Esp
IstCabProt.AddItem "fptk (MPa) " & fptk
IstCabProt.AddItem "psi70 (%)" & psi70
IstCabProt.AddItem "psi80 (%)" & psi80
IstCabProt.AddItem ""
```

```
MsgBox "Este arquivo texto pode modificar dados do arquivo de instalação das cordoalhas para protensão: Aço,
Esp, fptk, psi70 e psi80"
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_KeyPress(KeyAscii As Integer)
```

```
    If KeyAscii = vbKeyReturn Then
        SendKeys "{TAB}"
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
'Atribuição de valores às caixas de texto.
txtfck.Text = 25
txtjProt.Text = 28
txtEscHoriz.Text = 100
txtEscVert.Text = 25
```

```
'Arquivo de seções transversais.
DadoSecTransv(1, 1) = "T40x100" 'Nome
DadoSecTransv(2, 1) = "1,00" 'h (m)
DadoSecTransv(3, 1) = "0,746" 'yc (m)
DadoSecTransv(4, 1) = "1,04" 'Ac (m2)
DadoSecTransv(5, 1) = "0,0749" 'l (m4)
DadoSecTransv(6, 1) = "0,295" 'Ws (m3)
DadoSecTransv(7, 1) = "-0,100" 'Wi (m3)
```

```
DadoSecTransv(1, 2) = "T40x120" 'Nome
DadoSecTransv(2, 2) = "1,20" 'h (m)
DadoSecTransv(3, 2) = "0,886" 'yc (m)
DadoSecTransv(4, 2) = "1,12" 'Ac (m2)
DadoSecTransv(5, 2) = "0,128" 'l (m4)
DadoSecTransv(6, 2) = "0,408" 'Ws (m3)
DadoSecTransv(7, 2) = "-0,145" 'Wi (m3)
```

```
DadoSecTransv(1, 3) = "T40x140" 'Nome
DadoSecTransv(2, 3) = "1,40" 'h (m)
```

DadoSecTransv(3, 3) = "1,020" 'yc (m)
DadoSecTransv(4, 3) = "1,20" 'Ac (m2)
DadoSecTransv(5, 3) = "0,201" 'l (m4)
DadoSecTransv(6, 3) = "0,529" 'Ws (m3)
DadoSecTransv(7, 3) = "-0,197" 'Wi (m3)

DadoSecTransv(1, 4) = "T28x220" 'Nome
DadoSecTransv(2, 4) = "2,20" 'h (m)
DadoSecTransv(3, 4) = "1,339" 'yc (m)
DadoSecTransv(4, 4) = "1,2795" 'Ac (m2)
DadoSecTransv(5, 4) = "0,8011" 'l (m4)
DadoSecTransv(6, 4) = "0,931" 'Ws (m3)
DadoSecTransv(7, 4) = "-0,598" 'Wi (m3)

DadoSecTransv(1, 5) = "I17,5x112,5" 'Nome
DadoSecTransv(2, 5) = "1,125" 'h (m)
DadoSecTransv(3, 5) = "0,618" 'yc (m)
DadoSecTransv(4, 5) = "0,3500" 'Ac (m2)
DadoSecTransv(5, 5) = "0,048981" 'l (m4)
DadoSecTransv(6, 5) = "0,079257" 'Ws (m3)
DadoSecTransv(7, 5) = "-0,096609" 'Wi (m3)

For J = 1 To 10

'Adiciona título da seção transversal na ComboBox.

cboSecTransv.AddItem DadoSecTransv(1, J)

Next

'Cabos de protensão formados por cordoalhas de 7 fios,
'diâmetro 12,7mm, aço CP 190 RB.

Aço = "CP 190 RB"

Esp = 195000

fpyk = 1710

fptk = 1900

psi70 = 1.5 'psi70 máx. Norma = 2.5

psi80 = 2# 'psi80 máx. Norma = 3.5

NomCab(1) = "1 cord.12,7": Ap(1) = 1.002
NomCab(2) = "2 cord.12,7": Ap(2) = 2.004
NomCab(3) = "3 cord.12,7": Ap(3) = 3.006
NomCab(4) = "4 cord.12,7": Ap(4) = 4.008
NomCab(5) = "5 cord.12,7": Ap(5) = 5.01
NomCab(6) = "6 cord.12,7": Ap(6) = 6.012
NomCab(7) = "7 cord.12,7": Ap(7) = 7.014
NomCab(8) = "8 cord.12,7": Ap(8) = 8.016
NomCab(9) = "9 cord.12,7": Ap(9) = 9.018
NomCab(10) = "10 cord.12,7": Ap(10) = 10.02

NomCab(11) = "11 cord.12,7": Ap(11) = 11.022
NomCab(12) = "12 cord.12,7": Ap(12) = 12.024
NomCab(13) = "13 cord.12,7": Ap(13) = 13.026
NomCab(14) = "14 cord.12,7": Ap(14) = 14.028
NomCab(15) = "15 cord.12,7": Ap(15) = 15.03
NomCab(16) = "16 cord.12,7": Ap(16) = 16.032
NomCab(17) = "17 cord.12,7": Ap(17) = 17.034
NomCab(18) = "18 cord.12,7": Ap(18) = 18.036
NomCab(19) = "19 cord.12,7": Ap(19) = 19.038
NomCab(20) = "20 cord.12,7": Ap(20) = 20.04

NomCab(21) = "21 cord.12,7": Ap(21) = 21.042
NomCab(22) = "22 cord.12,7": Ap(22) = 22.044
NomCab(23) = "23 cord.12,7": Ap(23) = 23.046
NomCab(24) = "24 cord.12,7": Ap(24) = 24.048
NomCab(25) = "25 cord.12,7": Ap(25) = 25.05
NomCab(26) = "26 cord.12,7": Ap(26) = 26.052
NomCab(27) = "27 cord.12,7": Ap(27) = 27.054
NomCab(28) = "28 cord.12,7": Ap(28) = 28.056
NomCab(29) = "29 cord.12,7": Ap(29) = 29.058
NomCab(30) = "30 cord.12,7": Ap(30) = 30.06

NomCab(31) = "31 cord.12,7": Ap(31) = 31.062

'Seleção de todos os cabos de protensão formados por

'cordoalhas de 7 fios, diâmetro 12,7mm, aço CP 190 RB.

For TipCab = 1 To 31

frm2PréDimCab.chkcord12_7CP190RB(TipCab).Value = vbChecked

Next TipCab

End Sub

Private Sub optSecTouTT_Click()

'Determinação da tensão admissível no concreto para os
'ELS-CE e ELS-D.
SigmaELSCE = (-1) * 0.6 * fck
SigmaELSD = 0

'Determinação da tensão admissível no concreto para o
'ELS-F de uma seção transversal T ou TT.
SigmaELSF = 0.25 * fck ^ (2 / 3)

End Sub

Private Sub optSecRetang_Click()

'Determinação da tensão admissível no concreto para os
'ELS-CE e ELS-D.
SigmaELSCE = (-1) * 0.6 * fck
SigmaELSD = 0

'Determinação da tensão admissível no concreto para o
'ELS-F de uma seção transversal retangular.
SigmaELSF = 0.32 * fck ^ (2 / 3)

End Sub

Private Sub txtfck_LostFocus()

'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
fck = txtfck.Text

End Sub

Private Sub txtjProt_LostFocus()

'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
jProt = txtjProt.Text

'Cálculo de Ec.
Ec = 5600 * Sqr(fck)

'Impressão de Ec no formulário.
strEc = Format(Ec, "####0")
lblEc.Caption = "Ec (MPa) " & strEc

End Sub

Private Sub txtncabadot_LostFocus()

'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
ncabadot = txtncabadot.Text

'Cálculo e/ou atribuição e listagem de dados do cabo
'de protensão adotado.
CabProt = NomCab(CabSelec)
ncab = ncabadot
Pi = (-1) * Int((0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap(CabSelec) * 10 ^ -4) * ncab)
P0ins = (-1) * Int(0.94 * (0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap(CabSelec) * 10 ^ -4) * ncab)
Pinfinnomeq = (-1) * Int(0.76 * (0.82 * (fpyk * 10 ^ 3)) * (Ap(CabSelec) * 10 ^ -4) * ncab)
Ape = Ap(CabSelec) * ncab

Call ListDadCa b

End Sub

6.2.1 Código PréDimCab

Option Explicit

Private TipCab As Integer

Private Sub chkcord12_7CP190RB_Click(Index As Integer)

```
'Seleção ou deseleção dos cabos de protensão para este projeto.
If chkcord12_7CP190RB(Index).Value = vbChecked Then
    SelecProj(Index) = "Sim"
Else
    SelecProj(Index) = "Não"
End If
```

End Sub

Private Sub cmdDeselecTodosCab_Click()

```
'Deseleção de todos os cabos de protensão formados por
'cordoalhas de 7 fios, diâmetro 12,7mm, aço CP 190 RB.
For TipCab = 1 To 31
    chkcord12_7CP190RB(TipCab).Value = vbUnchecked
Next TipCab
```

End Sub

Private Sub cmdListar_Click()

```
'Listagem dos cabos de protensão selecionados para este projeto.
For TipCab = 1 To 31
    lstListar.Addltem TipCab & " " & SelecProj(TipCab)
Next TipCab
lstListar.AddItem ""
```

End Sub

Private Sub cmdSelecTodosCab_Click()

```
'Seleção de todos os cabos de protensão formados por
'cordoalhas de 7 fios, diâmetro 12,7mm, aço CP 190 RB.
For TipCab = 1 To 31
    chkcord12_7CP190RB(TipCab).Value = vbChecked
Next TipCab
```

End Sub

Private Sub Form_Load()

```
'Marcação dos cabos de protensão selecionados para
'este projeto.
For TipCab = 1 To 31
    If SelecProj(TipCab) = "Sim" Then
        chkcord12_7CP190RB(TipCab).Value = vbChecked
    End If
Next TipCab
```

End Sub

6.3 Código Cabos

Option Explicit

Private Cabo As Integer

Private x0(10) As Single
Private y0(10) As Single
Private x1(10) As Single
Private y1(10) As Single

Private a1(10) As Single
Private b1(10) As Single

```

Private c1(10) As Single
Private a2(10) As Single
Private b2(10) As Single
Private c2(10) As Single
Private a3(10) As Single
Private b3(10) As Single
Private c3(10) As Single

Private y As Single
Private ep(10, 50) As Single
Private Somep As Single
Private dy As Single
Private dy1 As Single
Private dynsec As Single
Private Somalfa(10, 50) As Single
Private SomSomalfa As Single

Private xd As Single
Private EscHoriz As Single
Private EscVert As Single
Private ye(50) As Single

Private strSeção As String
Private strep As String
Private strepe As String
Private strSomalfa As String
Private strSomalfae As String

Private ArqCam As String

Private Sub CalLisep()

'Calculo de ep(Cabo,Seção).
For Seção = 1 To nsec
    If x(Seção) <= x1(Cabo) Then
        y = a1(Cabo) * x(Seção) ^ 2 + b1(Cabo) * x(Seção) + c1(Cabo)
    ElseIf x(Seção) < (l - x1(Cabo)) Then
        y = c2(Cabo)
    Else
        y = a3(Cabo) * x(Seção) ^ 2 + b3(Cabo) * x(Seção) + c3(Cabo)
    End If
    ep(Cabo, Seção) = y - yc
Next

'Listagem de ep(Cabo,Seção).
Istep.AddItem "Cabo " & Cabo
For Seção = 1 To nsec
    strSeção = Format(Seção, "00")
    strep = Format(ep(Cabo, Seção), "Fixed")
    Istep.AddItem strSeção & " " & strep
Next
Istep.AddItem " "

End Sub

Private Sub CalLisSomalfa()

'Calculo de Somalfa(Cabo,Seção).
For Seção = 1 To nsec
    If x(Seção) <= x1(Cabo) Then
        dy = 2 * a1(Cabo) * x(Seção) + b1(Cabo)
        dy1 = 2 * a1(Cabo) * x(1) + b1(Cabo)
        Somalfa(Cabo, Seção) = Abs(dy - dy1)
    ElseIf x(Seção) <= l / 2 Then
        dy = 0
        dy1 = 2 * a1(Cabo) * x(1) + b1(Cabo)
        Somalfa(Cabo, Seção) = Abs(dy - dy1)
    ElseIf x(Seção) < (l - x1(Cabo)) Then
        dy = 0
        dynsec = 2 * a3(Cabo) * x(nsec) + b3(Cabo)
        Somalfa(Cabo, Seção) = Abs(dy - dynsec)
    Else
        dy = 2 * a3(Cabo) * x(Seção) + b3(Cabo)
        dynsec = 2 * a3(Cabo) * x(nsec) + b3(Cabo)
        Somalfa(Cabo, Seção) = Abs(dy - dynsec)
    End If
Next

```

```

Next

'Listagem de Somalfa(Cabo,Seção).
IstSomalfa.AddItem "Cabo " & Cabo
For Seção = 1 To nsec
    strSeção = Format(Seção, "00")
    strSomalfa = Format(Somalfa(Cabo, Seção), "0.0000")
    IstSomalfa.AddItem strSeção & " " & strSomalfa
Next
IstSomalfa.AddItem " "

End Sub

Private Sub DesenhoCabo()

'Desenho do cabo.
For xd = 0 To l Step 0.05
    If xd <= x1(Cabo) Then
        PSet (xd * 100 / EscHoriz, (a1(Cabo) * xd ^ 2 + b1(Cabo) * xd + c1(Cabo)) * 100 / EscVert)
    ElseIf xd < (l - x1(Cabo)) Then
        PSet (xd * 100 / EscHoriz, c2(Cabo) * 100 / EscVert)
    Else
        PSet (xd * 100 / EscHoriz, (a3(Cabo) * xd ^ 2 + b3(Cabo) * xd + c3(Cabo)) * 100 / EscVert)
    End If
Next

End Sub

Private Sub DesVig()

'Desenho da viga e baricentro.
EscHoriz = txtEscHoriz.Text
EscVert = txtEscVert.Text

Line (0, 0)-Step(l * 100 / EscHoriz, h * 100 / EscVert), , B
CurrentX = 0
CurrentY = 0
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, -(h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)
Line -Step(-(h / 5) * 100 / EscHoriz, 0)
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, (h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)
CurrentX = l * 100 / EscHoriz
CurrentY = 0
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, -(h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)
Line -Step(-(h / 5) * 100 / EscHoriz, 0)
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, (h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)

DrawStyle = 3
Line (0, yc * 100 / EscVert)-(l * 100 / EscHoriz, yc * 100 / EscVert)
DrawStyle = 0

End Sub

Private Sub ParâmetrosParábolas()

'Calculo dos parâmetros das parábolas.
a1(Cabo) = (y0(Cabo) - y1(Cabo)) / (x0(Cabo) - x1(Cabo)) ^ 2
b1(Cabo) = (-1) * 2 * x1(Cabo) * (y0(Cabo) - y1(Cabo)) / (x0(Cabo) - x1(Cabo)) ^ 2
c1(Cabo) = (1) * x0(Cabo) * (x0(Cabo) - 2 * x1(Cabo)) * (y0(Cabo) - y1(Cabo)) / (x0(Cabo) - x1(Cabo)) ^ 2 +
y0(Cabo)

a2(Cabo) = 0
b2(Cabo) = 0
c2(Cabo) = y1(Cabo)

a3(Cabo) = (y0(Cabo) - y1(Cabo)) / ((l - x0(Cabo)) - (l - x1(Cabo))) ^ 2
b3(Cabo) = (-1) * 2 * (l - x1(Cabo)) * (y0(Cabo) - y1(Cabo)) / ((l - x0(Cabo)) - (l - x1(Cabo))) ^ 2
c3(Cabo) = (1) * (l - x0(Cabo)) * ((l - x0(Cabo)) - 2 * (l - x1(Cabo))) * (y0(Cabo) - y1(Cabo)) / ((l - x0(Cabo)) - (l -
x1(Cabo))) ^ 2 + y0(Cabo)

End Sub

Private Sub cmdApagarDesenho_Click()

Cls

End Sub

```

```

Private Sub cmdAvançar_Click()

    frm3Cabos.Hide
    frm4Perdas.Show

End Sub

Private Sub cmdCurlim_Click()

    'Desenho da viga e baricentro.
    Call DesVig

    'Desenho das curvas limite.
    For Seção = 1 To nsec - 1
        Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, yli(Seção) * 100 / EscVert)(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz, yli(Seção + 1) * 100 / EscVert), vbWhite
    Next
    For Seção = 1 To nsec - 1
        Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, yls(Seção) * 100 / EscVert)(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz, yls(Seção + 1) * 100 / EscVert), vbWhite
    Next

End Sub

Private Sub cmdDesCabEquiv_Click()

    'Desenho do cabo equivalente.
    For Seção = 1 To nsec
        ye(Seção) = yc + epe(Seção)
    Next
    For Seção = 1 To nsec - 1
        Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, ye(Seção) * 100 / EscVert)(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz, ye(Seção + 1) * 100 / EscVert), vbBlue
    Next

End Sub

Private Sub cmdDesVigCab_Click()

    'Desenho da viga e baricentro.
    Call DesVig

    'Desenho do cabo.
    Call DesenhoCabo

    'Mensagem de erro.
    MsgBox "!!! ep, Somalfa"

End Sub

Private Sub cmdep_Click()

    'Calculo e listagem de ep(Cabo,Seção).
    Call CalLisep

End Sub

Private Sub cmdepe_Click()

    'Calculo de epe(Seção).
    For Seção = 1 To nsec
        For Cabo = 1 To ncab
            Somep = Somep + ep(Cabo, Seção)
        Next Cabo
        epe(Seção) = Somep / ncab
        Somep = 0
    Next Seção

    'Listagem de epe(Seção).
    For Seção = 1 To nsec
        strSeção = Format(Seção, "00")
        strepe = Format(epe(Seção), "Fixed")
        lstepe.AddItem strSeção & " " & strepe
    Next
    lstepe.AddItem " "

```

End Sub

Private Sub cmdGeometriaOK_Click()

```
'Atribuição da geometria dos cabos as variáveis.
ncab = txtncab.Text
Cabo = txtCabo.Text
x0(Cabo) = txtx0.Text
y0(Cabo) = txtx0.Text
x1(Cabo) = txtx1.Text
y1(Cabo) = txtx1.Text
```

```
'Calculo dos parâmetros das parábolas.
Call ParâmetrosParábolas
```

End Sub

Private Sub cmdRetornar_Click()

```
frm3Cabos.Hide
frm2PréDim.Show
```

End Sub

Private Sub cmdSomalfa_Click()

```
'Calculo e listagem de Somalfa(Cabo,Seção).
Call CalLisSomalfa
```

End Sub

Private Sub cmdSomalfae_Click()

```
'Calculo de Somalfae(Seção).
For Seção = 1 To nsec
  For Cabo = 1 To ncab
    SomSomalfa = SomSomalfa + Somalfa(Cabo, Seção)
  Next Cabo
  Somalfae(Seção) = SomSomalfa / ncab
  SomSomalfa = 0
Next Seção
```

```
'Listagem de Somalfae(Seção).
For Seção = 1 To nsec
  strSeção = Format(Seção, "00")
  strSomalfae = Format(Somalfae(Seção), "0.0000")
  lstSomalfae.AddItem strSeção & " " & strSomalfae
Next
lstSomalfae.AddItem " "
```

End Sub

Private Sub Dir1_Change()

```
File1.Path = Dir1.Path
```

End Sub

Private Sub Drive1_Change()

```
Dir1.Path = Drive1.Drive
```

End Sub

Private Sub File1_Click()

```
ArqCam = File1.Path & "\" & File1.FileName
```

```
'Atribuição dos dados do arquivo texto as variáveis.
Open ArqCam For Input As #1
Input #1, ncab
For Cabo = 1 To ncab
  Input #1, x0(Cabo)
  Input #1, y0(Cabo)
  Input #1, x1(Cabo)
  Input #1, y1(Cabo)
```

```

Next
Close #1

'Listagem dos dados das variáveis / arquivo texto.
List1.AddItem "ncab " & ncab
For Cabo = 1 To ncab
    List1.AddItem " "
    List1.AddItem "Cabo " & Cabo
    List1.AddItem "x0(" & Cabo & ") (m) " & x0(Cabo)
    List1.AddItem "y0(" & Cabo & ") (m) " & y0(Cabo)
    List1.AddItem "x1(" & Cabo & ") (m) " & x1(Cabo)
    List1.AddItem "y1(" & Cabo & ") (m) " & y1(Cabo)
Next

'Desenho da viga.
Call DesVig

'Desenho dos cabos.
For Cabo = 1 To ncab
    'Calculo dos parâmetros das parábolas.
    Call ParâmetrosParábolas
    'Desenho do cabo.
    Call DesenhoCabo
Next

'Calculo e listagem de ep(Cabo,Seção).
For Cabo = 1 To ncab
    'Calculo e listagem de ep(Cabo,Seção).
    Call CallLisep
Next

'Calculo e listagem de Somalfa(Cabo,Seção).
For Cabo = 1 To ncab
    'Calculo e listagem de Somalfa(Cabo,Seção).
    Call CallLisSomalfa
Next

End Sub

Private Sub Form_KeyPress(KeyAscii As Integer)

    If KeyAscii = vbKeyReturn Then
        SendKeys "{TAB}"
    End If

End Sub

Private Sub Form_Load()

    txtEscHoriz.Text = 100
    txtEscVert.Text = 25

End Sub

```

6.4 Código Perdas

'Perdas de protensão; cabos com ancoragens ativas em ambas
'extremidades; nsec impar >= 3.

```

Option Explicit

Private Pa(50) As Single
Private mü As Single
Private strSeção As String
Private strPa As String
Private EscHoriz As Single
Private EscVert As Single
Private SesPa1 As Single

Private MetAreaPerCra As Single

```

```

Private delta As Single
Private MetArea As Single
Private xac As Single
Private ModPac As Single
Private Pc(50) As Single
Private strPc As String

Private Sigmacpg1 As Single
Private Sigmacpp As Single
Private DeltaSigmap As Single
Private strP0 As String

Private fiinfin As Single
Private épsiloncsinfin As Single
Private Psiinfin As Single
Private DeltaSigmapcs As Single
Private DeltaSigmapcsri As Single
Private DeltaSigmapcsr1 As Single
Private Sigmacpp0 As Single
Private Sigma p0 As Single
Private Sigmacpg As Single
Private SigmaPiCEB As Single
Private Pinfin(50) As Single
Private strPinfin As String

Private ArqCam As String

Private Sub cmdApagarDesenho_Click()

    Cls

End Sub

Private Sub cmdAvançar_Click()

    frm4Perdas.Hide
    frm5VerifTens.Show

End Sub

Private Sub cmdPAtrito_Click()

'Perdas por atrito; eliminação do exponencial; curva ---> reta.

'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
mü = txtmü.Text

'Calculo das perdas.
For Seção = 1 To nsec / 2 + 0.5
    Pa(Seção) = Pi * (1 - mü * (Somalfae(Seção) + 0.01 * x(Seção)))
Next
For Seção = nsec / 2 + 1.5 To nsec
    Pa(Seção) = Pi * (1 - mü * (Somalfae(Seção) + 0.01 * (1 - x(Seção))))
Next

'Listagem das perdas.
For Seção = 1 To nsec
    strSeção = Format(Seção, "00")
    strPa = Format(Pa(Seção), "#####")
    lstPAtrito.AddItem strSeção & " " & strPa
Next
lstPAtrito.AddItem " "

'Desenho da viga.
EscHoriz = txtEscHoriz.Text
EscVert = txtEscVert.Text

Line (0, 0)-Step(l * 100 / EscHoriz, h * 100 / EscVert), , B
CurrentX = 0
CurrentY = 0
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, -(h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)
Line -Step((h / 5) * 100 / EscHoriz, 0)
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, (h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)
CurrentX = l * 100 / EscHoriz
CurrentY = 0
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, -(h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)

```

```

Line -Step((h / 5) * 100 / EscHoriz, 0)
Line -Step((h / 5) / 2 * 100 / EscHoriz, (h / 5) * Sqr(3) / 2 * 100 / EscHoriz)

'Plotagem de Pa(Seção).
SesPa1 = 0.6 * Pa(1)
For Seção = 1 To nsec - 1
    Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, Abs(Pa(Seção) - SesPa1) / EscVert)-(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz,
Abs(Pa(Seção + 1) - SesPa1) / EscVert)
Next

End Sub

Private Sub cmdPCravação_Click()

'Perdas por deslizamento da armadura na ancoragem e
'acomodação da ancoragem.

'Atribuição do valor da caixa de texto à variável.
delta = txtdelta.Text

'Calculo das perdas.
MetAreaPerCra = Esp * 10 ^ 3 * Ape * 10 ^ -4 * delta * 10 ^ -3 / 2
Seção = 1
MetArea = 0
MetArea = MetArea + (x(Seção) + x(Seção + 1)) / 2 * (Abs(Pa(Seção)) - Abs(Pa(Seção + 1)))
Do While MetArea < MetAreaPerCra
    If x(Seção + 1) < l / 2 Then
        Seção = Seção + 1
        MetArea = MetArea + (x(Seção) + x(Seção + 1)) / 2 * (Abs(Pa(Seção)) - Abs(Pa(Seção + 1)))
    Else
        ModPac = Abs(Pa(Seção + 1)) + (MetArea - MetAreaPerCra) / (l / 2)
        GoTo CalcPerCra
    End If
Loop
xac = Sqr(x(Seção + 1) ^ 2 + (MetAreaPerCra - MetArea) / ((Abs(Pa(Seção)) - Abs(Pa(Seção + 1))) / (2 * l / nsec)))
ModPac = Abs(Pa(Seção + 1)) + (Abs(Pa(Seção)) - Abs(Pa(Seção + 1))) / (l / nsec) * (x(Seção + 1) - xac)
CalcPerCra:
For Seção = 1 To nsec / 2 + 0.5
    If Abs(Pa(Seção)) > ModPac Then
        Pc(Seção) = (-1) * (Abs(Pa(Seção)) - (Abs(Pa(Seção)) - ModPac) * 2)
    Else
        Pc(Seção) = Pa(Seção)
    End If
Next Seção
For Seção = nsec / 2 + 1.5 To nsec
    Pc(Seção) = Pc(nsec + 1 - Seção)
Next Seção

'Listagem das perdas.
For Seção = 1 To nsec
    strSeção = Format(Seção, "00")
    strPc = Format(Pc(Seção), "#####")
    lstPCravação.AddItem strSeção & " " & strPc
Next
lstPCravação.AddItem " "

'Plotagem de Pc(Seção).
For Seção = 1 To nsec - 1
    Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, Abs(Pc(Seção) - SesPa1) / EscVert)-(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz,
Abs(Pc(Seção + 1) - SesPa1) / EscVert)
Next

End Sub

Private Sub cmdPElásticas_Click()

'Perdas por encurtamento imediato do concreto.

'Calculo das perdas.
For Seção = 1 To nsec
    Sigmacpg1 = (-1) * (Mg1(Seção) / l * epe(Seção)) * 10 ^ -3
    Sigmacpp = (Pc(Seção) / Ac * 10 ^ -3) + (((-1) * ((-1) * Pc(Seção) * epe(Seção)) / l * epe(Seção)) * 10 ^ -3)
    DeltaSigma = Esp / Ec * (Sigmacpp + Sigmacpg1) * (ncab - 1) / (2 * ncab)
    P0(Seção) = Pc(Seção) + (((-1) * DeltaSigma * Ape * 10 ^ -4) * 10 ^ 3)
Next

```



```

'Listagem das perdas.
For Seção = 1 To nsec
    strSeção = Format(Seção, "00")
    strP0 = Format(P0(Seção), "#####")
    IstPElásticas.AddItem strSeção & " " & strP0
Next
IstPElásticas.AddItem " "

'Plotagem de P0(Seção).
For Seção = 1 To nsec - 1
    Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, Abs(P0(Seção) - SesPa1) / EscVert)-(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz,
Abs(P0(Seção + 1) - SesPa1) / EscVert)
Next

End Sub

Private Sub cmdPPProgressivas_Click()

'Perdas Progressivas.

'Atribuição dos valores das caixas de texto às variáveis.
fiiifin = txtfiiifin.Text
épsiloncsinfin = txtépsiloncsinfin.Text

'Calculo das perdas.
For Seção = 1 To nsec
    Sigmacpp0 = (P0(Seção) / Ac) * 10 ^ -3 + (-1) * ((-1) * P0(Seção) * epe(Seção) / l) * epe(Seção) * 10 ^ -3
    Sigmap0 = (-1) * P0(Seção) / (Ape * 10 ^ -4) * 10 ^ -3
    Sigmacpg = (-1) * (Mg1(Seção) + Mg2(Seção)) / l * epe(Seção) * 10 ^ -3 'Sigmacpg = (-1) * Mg1(Seção) / l *
epe(Seção) * 10 ^ -3
    DeltaSigmapcs = 1 / (1 - Esp / Ec * Sigmacpp0 / Sigmap0 * (1 + fiiifin / 2)) * (épsiloncsinfin * 10 ^ -3 * Esp + Esp /
Ec * fiiifin * (Sigmacpp0 + Sigmacpg))
    DeltaSigmapcsri = DeltaSigmapcs
Inicio:
    SigmaPiCEB = Sigmap0 + Esp / Ec * Sigmacpg + 0.3 * DeltaSigmapcsri
    Psiifin = 2 * (10 * (psi80 * 10 ^ -2 - psi70 * 10 ^ -2) * Sigmap0 / fptk + 8 * psi70 * 10 ^ -2 - 7 * psi80 * 10 ^ -2)
    DeltaSigmapcsri1 = DeltaSigmapcs + 1 / (1 - Esp / Ec * Sigmacpp0 / Sigmap0 * (1 + fiiifin / 2)) * (Psiifin *
SigmaPiCEB)
    If Abs(DeltaSigmapcsri1 - DeltaSigmapcsri) > 1 Then
        DeltaSigmapcsri = DeltaSigmapcsri1
        GoTo Inicio
    End If
    Prog(Seção) = (-1) * DeltaSigmapcsri1 * (Ape * 10 ^ -4) * 10 ^ 3
    Pinfin(Seção) = P0(Seção) + Prog(Seção)
Next

'Listagem das perdas.
For Seção = 1 To nsec
    strSeção = Format(Seção, "00")
    strPinfin = Format(Pinfin(Seção), "#####")
    IstPPProgressivas.AddItem strSeção & " " & strPinfin
Next
IstPPProgressivas.AddItem " "

'Plotagem de Pinfin(Seção).
For Seção = 1 To nsec - 1
    Line (x(Seção) * 100 / EscHoriz, Abs(Pinfin(Seção) - SesPa1) / EscVert)-(x(Seção + 1) * 100 / EscHoriz,
Abs(Pinfin(Seção + 1) - SesPa1) / EscVert)
Next

End Sub

Private Sub cmdRetornar_Click()

frm4Perdas.Hide
frm3Cabos.Show

End Sub

Private Sub Dir1_Change()

File1.Path = Dir1.Path

End Sub

```

```

Private Sub Drive1_Change()
    Dir1.Path = Drive1.Drive
End Sub

Private Sub File1_Click()
    ArqCam = File1.Path & "\" & File1.FileName

    'Atribuição dos dados do arquivo texto as variáveis.
    Open ArqCam For Input As #1
    Input #1, mü
    Input #1, delta
    Input #1, fiinfin
    Input #1, épsiloncsinfin
    Close #1

    'Preenchimento das caixas de texto com os valores das
    'variáveis atribuídos pelo arquivo texto.
    txtmü.Text = mü
    txtdelta.Text = delta
    txtfiinfin.Text = fiinfin
    txtépsiloncsinfin.Text = épsiloncsinfin
End Sub

Private Sub Form_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    If KeyAscii = vbKeyReturn Then
        SendKeys "{TAB}"
    End If
End Sub

Private Sub Form_Load()
    txtEscHoriz.Text = 100
    txtEscVert.Text = 500
End Sub

```

6.5 Código VerifTens

```

Option Explicit

Dim I As Integer

Private psi1Mq As Single
Private psi2Mq As Single
Private humMq As Single
Private MetProg As Single

Private SigmaSP0 As Single
Private SigmaSg1 As Single
Private SigmaSg2 As Single
Private SigmaSq As Single
Private SigmaSpsi1q As Single
Private SigmaSpsi2q As Single
Private SigmaSProg As Single
Private SigmaSMetProg As Single
Private SigmaIP0 As Single
Private SigmaIq1 As Single
Private SigmaIq2 As Single
Private SigmaIq As Single
Private SigmaIpsi1q As Single
Private SigmaIpsi2q As Single
Private SigmaIProg As Single
Private SigmaIMetProg As Single

```

```

Private SomSigmaSP0 As Single
Private SomSigmaSg1 As Single
Private SomSigmaSg2 As Single
Private SomSigmaSFinCon As Single
Private SomSigmaSpsi1q As Single
Private SomSigmaSComFre As Single
Private SomSigmaSpsi2q As Single
Private SomSigmaSComQuaPer As Single
Private SomSigmaSq As Single
Private SomSigmaSComRar As Single
Private SomSigmaIP0 As Single
Private SomSigmaIlg1 As Single
Private SomSigmaIlg2 As Single
Private SomSigmaIFinCon As Single
Private SomSigmaIpsi1q As Single
Private SomSigmaIComFre As Single
Private SomSigmaIpsi2q As Single
Private SomSigmaIComQuaPer As Single
Private SomSigmaIq As Single
Private SomSigmaIComRar As Single

Private strEc As String
Private strSigmaELSCe As String
Private strSigmaELSF As String
Private strSeção As String
Private strepe As String
'Private strNomeComb As String * 20
'Private strNomeCarreg As String * 20
Private strEsf As String
Private strSigmaS As String
Private strSomSigmaS As String
Private strSigmaI As String
Private strSomSigmaI As String

Private Sub cmdRetornar_Click()

    frm5VerifTens.Hide
    frm4Perdas.Show

End Sub

Private Sub cmdVerifTens_Click()

    'Impressão de dados relevantes no formulário.
    lblSecTransv.Caption = "Seç.Transv. " & SecTransv
    lblI.Caption = "I (m) " & I
    Select Case strNivProt
        Case "ProtParcial"
            lblNivProt.Caption = "Protensão parcial"
        Case "ProtLimitada"
            lblNivProt.Caption = "Protensão limitada"
        Case "ProtCompleta"
            lblNivProt.Caption = "Protensão completa"
    End Select
    lblfck.Caption = "fck (MPa) " & fck
    strEc = Format(Ec, "###0")
    lblEc.Caption = "Ec (MPa) " & strEc
    lblg1.Caption = "g1 (kN/m) " & g1
    lblg2.Caption = "g2 (kN/m) " & g2
    lblq.Caption = "q (kN/m) " & q
    lblAc.Caption = "Ac (m2) " & Ac
    lblI.Caption = "I (m4) " & I
    lblWs.Caption = "Ws (m3) " & Ws
    lblWi.Caption = "Wi (m3) " & Wi
    lblAço.Caption = "Aço " & Aço
    lblCabProt.Caption = "CabProt " & CabProt
    lblncab.Caption = "ncab " & ncab
    lblApe.Caption = "Ape (cm2) " & Ape
    lblPi.Caption = "Pi (kN) " & Pi
    lblEsp.Caption = "Esp (MPa) " & Esp
    strSigmaELSCe = Format(SigmaELSCe, "#0.0")
    lblSigmaELSCe.Caption = "SigmaELSCe (MPa) " & strSigmaELSCe
    lblSigmaELSD.Caption = "SigmaELSD (MPa) " & SigmaELSD
    strSigmaELSF = Format(SigmaELSF, "#0.0")
    lblSigmaELSF.Caption = "SigmaELSF (MPa) " & strSigmaELSF

```

```

For Seção = 1 To nsec
'Calculo das tensões.
SigmaSg1 = (-Mg1(Seção) / Ws) * 10 ^ -3
SigmaSg2 = (-Mg2(Seção) / Ws) * 10 ^ -3
SigmaSq = (-Mq(Seção) / Ws) * 10 ^ -3
SigmaSP0 = (P0(Seção) / Ac - (P0(Seção) * epe(Seção)) / Ws) * 10 ^ -3
SigmaSProg = (Prog(Seção) / Ac - (Prog(Seção) * epe(Seção)) / Ws) * 10 ^ -3

SigmaI1 = (-Mg1(Seção) / Wi) * 10 ^ -3
SigmaI2 = (-Mg2(Seção) / Wi) * 10 ^ -3
SigmaIq = (-Mq(Seção) / Wi) * 10 ^ -3
SigmaIP0 = (P0(Seção) / Ac - (P0(Seção) * epe(Seção)) / Wi) * 10 ^ -3
SigmaIProg = (Prog(Seção) / Ac - (Prog(Seção) * epe(Seção)) / Wi) * 10 ^ -3

'Tabela de verificação de tensões, combinação e listagem das tensões.
'0.linha da tabela, títulos.
strSeção = Format(Seção, "00")
strepe = Format(epe(Seção), "0.00")

msgVerifTens.AddItem "Seção " & strSeção & vbTab & " epe (m)" & vbTab & strepe _
& vbTab & "SigmaS (MPa)" & vbTab & "SomSigmaS (MPa)" & vbTab & "SigmaI (MPa)" & vbTab & "SomSigmaI
(MPa)"

'1.linha da tabela, P0.
SomSigmaSP0 = SigmaSP0
SomSigmaIP0 = SigmaIP0

strEsf = Format(P0(Seção), "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSP0, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSP0, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIP0, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIP0, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "" & vbTab & " P0 (kN) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI

'2.linha da tabela, Mg1.
SomSigmaSg1 = SomSigmaSP0 + SigmaSg1
SomSigmaI1 = SomSigmaIP0 + SigmaI1

strEsf = Format(Mg1(Seção), "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSg1, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSg1, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaI1, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaI1, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "Protensão" & vbTab & " Mg1 (kN.m) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI

'3.linha da tabela, Mg2.
SomSigmaSg2 = SomSigmaSg1 + SigmaSg2
SomSigmaI2 = SomSigmaI1 + SigmaI2

strEsf = Format(Mg2(Seção), "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSg2, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSg2, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaI2, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaI2, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "" & vbTab & " Mg2 (kN.m) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI

'4.linha da tabela, 0,5Prog.
MetProg = 0.5 * Prog(Seção)
SigmaSMetProg = 0.5 * SigmaSProg
SomSigmaSFinCon = SomSigmaSg2 + SigmaSMetProg
SigmaIMetProg = 0.5 * SigmaIProg
SomSigmaIFinCon = SomSigmaI2 + SigmaIMetProg

strEsf = Format(MetProg, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSMetProg, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSFinCon, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIMetProg, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIFinCon, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "Final Constr." & vbTab & " 0,5Prog. (kN) " & vbTab & strEsf _

```

& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI

Select Case strNivProt

Case "ProtParcial" 'Protensão parcial.

'5.linha da tabela, psi1Mq.
psi1Mq = psi1 * Mq(Seção)
SigmaSpsi1q = psi1 * SigmaSq
SomSigmaSpsi1q = SomSigmaSFinCon + SigmaSpsi1q
SigmaIpsi1q = psi1 * SigmaIq
SomSigmaIpsi1q = SomSigmaIFinCon + SigmaIpsi1q

strEsf = Format(psi1Mq, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSpsi1q, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSpsi1q, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIpsi1q, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIpsi1q, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "" & vbTab & " " & psi1 & "Mq (kN.m) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI

'6.linha da tabela, 0,5Prog.

SomSigmaSComFre = SomSigmaSpsi1q + SigmaSMetProg
SomSigmaIComFre = SomSigmaIpsi1q + SigmaIMetProg

strEsf = Format(MetProg, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSMetProg, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSComFre, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIMetProg, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIComFre, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "Comb.Freq." & vbTab & " " & 0,5Prog. (kN) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI

'7.linha da tabela, psi2Mq.

psi2Mq = psi2 * Mq(Seção)
SigmaSpsi2q = psi2 * SigmaSq
SomSigmaSpsi2q = SomSigmaSFinCon + SigmaSpsi2q
SigmaIpsi2q = psi2 * SigmaIq
SomSigmaIpsi2q = SomSigmaIFinCon + SigmaIpsi2q

strEsf = Format(psi2Mq, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSpsi2q, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSpsi2q, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIpsi2q, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIpsi2q, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "" & vbTab & " " & psi2 & "Mq (kN.m) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI

'8.linha da tabela, 0,5Prog.

SomSigmaSComQuaPer = SomSigmaSpsi2q + SigmaSMetProg
SomSigmaIComQuaPer = SomSigmaIpsi2q + SigmaIMetProg

strEsf = Format(MetProg, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSMetProg, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSComQuaPer, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIMetProg, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIComQuaPer, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "Comb.Q.Perm." & vbTab & " " & 0,5Prog. (kN) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI

Case "ProtLimitada" 'Protensão limitada.

'5.linha da tabela, psi1Mq.
psi1Mq = psi1 * Mq(Seção)
SigmaSpsi1q = psi1 * SigmaSq
SomSigmaSpsi1q = SomSigmaSFinCon + SigmaSpsi1q
SigmaIpsi1q = psi1 * SigmaIq
SomSigmaIpsi1q = SomSigmaIFinCon + SigmaIpsi1q

strEsf = Format(psi1Mq, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSpsi1q, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSpsi1q, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIpsi1q, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIpsi1q, "#0.0")

```
msgVerifTens.AddItem "" & vbTab & " " & psi1 & "Mq (kN.m) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI
```

'6.linha da tabela, 0,5Prog.

```
SomSigmaSComFre = SomSigmaSpsi1q + SigmaSMetProg
SomSigmaIComFre = SomSigmaIpsi1q + SigmaIMetProg
```

```
strEsf = Format(MetProg, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSMetProg, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSComFre, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIMetProg, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIComFre, "#0.0")
```

```
msgVerifTens.AddItem "Comb.Freq." & vbTab & " 0,5Prog. (kN) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI
```

'7.linha da tabela, psi2Mq.

```
psi2Mq = psi2 * Mq(Seção)
SigmaSpsi2q = psi2 * SigmaSq
SomSigmaSpsi2q = SomSigmaSFinCon + SigmaSpsi2q
SigmaIpsi2q = psi2 * SigmaIq
SomSigmaIpsi2q = SomSigmaIFinCon + SigmaIpsi2q
```

```
strEsf = Format(psi2Mq, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSpsi2q, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSpsi2q, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIpsi2q, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIpsi2q, "#0.0")
```

```
msgVerifTens.AddItem "" & vbTab & " " & psi2 & "Mq (kN.m) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI
```

'8.linha da tabela, 0,5Prog.

```
SomSigmaSComQuaPer = SomSigmaSpsi2q + SigmaSMetProg
SomSigmaIComQuaPer = SomSigmaIpsi2q + SigmaIMetProg
```

```
strEsf = Format(MetProg, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSMetProg, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSComQuaPer, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIMetProg, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIComQuaPer, "#0.0")
```

```
msgVerifTens.AddItem "Comb.Q.Perm." & vbTab & " 0,5Prog. (kN) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI
```

Case "ProtCompleta" 'Protensão completa.

'5.linha da tabela, 1,0Mq.

```
humMq = 1 * Mq(Seção)
SomSigmaSq = SomSigmaSFinCon + SigmaSq
SomSigmaIq = SomSigmaIFinCon + SigmaIq
```

```
strEsf = Format(humMq, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSq, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSq, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIq, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIq, "#0.0")
```

```
msgVerifTens.AddItem "" & vbTab & " " & " 1,0Mq (kN.m) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI
```

'6.linha da tabela, 0,5Prog.

```
SomSigmaSComRar = SomSigmaSq + SigmaSMetProg
SomSigmaIComRar = SomSigmaIq + SigmaIMetProg
```

```
strEsf = Format(MetProg, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSMetProg, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSComRar, "#0.0")
strSigmaI = Format(SigmaIMetProg, "#0.0")
strSomSigmaI = Format(SomSigmaIComRar, "#0.0")
```

```
msgVerifTens.AddItem "Comb.Rara" & vbTab & " 0,5Prog. (kN) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigmaI & vbTab & strSomSigmaI
```

'7.linha da tabela, psi1Mq.

```
psi1Mq = psi1 * Mq(Seção)
SigmaSpsi1q = psi1 * SigmaSq
```

```

SomSigmaSpsi1q = SomSigmaSFinCon + SigmaSpsi1q
Sigma1psi1q = psi1 * Sigma1q
SomSigma1psi1q = SomSigma1FinCon + Sigma1psi1q

strEsf = Format(psi1Mq, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSpsi1q, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSpsi1q, "#0.0")
strSigma1 = Format(Sigma1psi1q, "#0.0")
strSomSigma1 = Format(SomSigma1psi1q, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "" & vbTab & " " & psi1 & "Mq (kN.m) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigma1 & vbTab & strSomSigma1

'8.linha da tabela, 0,5Prog.
SomSigmaSComFre = SomSigmaSpsi1q + SigmaSMetProg
SomSigma1ComFre = SomSigma1psi1q + Sigma1MetProg

strEsf = Format(MetProg, "####0")
strSigmaS = Format(SigmaSMetProg, "#0.0")
strSomSigmaS = Format(SomSigmaSComFre, "#0.0")
strSigma1 = Format(Sigma1MetProg, "#0.0")
strSomSigma1 = Format(SomSigma1ComFre, "#0.0")

msgVerifTens.AddItem "Comb.Freq." & vbTab & " 0,5Prog. (kN) " & vbTab & strEsf _
& vbTab & strSigmaS & vbTab & strSomSigmaS & vbTab & strSigma1 & vbTab & strSomSigma1
End Select
msgVerifTens.AddItem ""
msgVerifTens.AddItem ""
Next

'Alteração de cor no texto da tabela.
'For l = 0 To msgVerifTens.Rows - 1
' If msgVerifTens.TextMatrix(l, 6) <> "" And IsNumeric(msgVerifTens.TextMatrix(l, 6)) Then
' If CSng(msgVerifTens.TextMatrix(l, 6)) > SigmaELSD Or CSng(msgVerifTens.TextMatrix(l, 6)) < SigmaELSCF
Then
' msgVerifTens.Col = 6
' msgVerifTens.Row = l
' Muda cor da fonte.
' msgVerifTens.CellForeColor = vbBlue
' Muda cor da célula.
' msgVerifTens.CellBackColor = vbRed
' End If
' End If
Next

End Sub

Private Sub Form_Load()

'Especificação da largura das colunas do MSFlexGrid.
msgVerifTens.ColWidth(0) = 1200
msgVerifTens.ColWidth(1) = 1500
msgVerifTens.ColWidth(3) = 1200
msgVerifTens.ColWidth(4) = 1500
msgVerifTens.ColWidth(5) = 1200
msgVerifTens.ColWidth(6) = 1500

End Sub

```

6.6 Código de definição das variáveis globais (VarGlob)

Option Explicit

'Variáveis globais.

'Geometria.
Public Seção As Integer
Public nsec As Integer
Public l As Single
Public x(50) As Single

Public SecTransv As String
Public h As Single
Public yc As Single
Public Ac As Single
Public l As Single
Public Ws As Single
Public Wi As Single

'Cargas.
Public g1 As Single
Public g2 As Single
Public q As Single
Public Mg1(50) As Single
Public Mg2(50) As Single
Public Mq(50) As Single
Public psi1 As Single
Public psi2 As Single
Public strNivProt As String

'Concreto.
Public fck As Single
Public Ec As Single
Public SigmaELSCE As Single
Public SigmaELSD As Single
Public SigmaELSF As Single
Public fiinfin As Single
Public épsiloncsinfin As Single

'Cabos.
Public Aço As String
Public CabProt As String
Public SelecProj(31) As String
Public Esp As Single
Public fptk As Single
Public fpyk As Single
Public psi70 As Single
Public psi80 As Single
Public ncab As Integer
Public Ape As Single
Public Pi As Single
Public mü As Single
Public delta As Single
Public epe(50) As Single
Public yli(50) As Single
Public yls(50) As Single
Public Somalfae(50) As Single
Public P0(50) As Single
Public Prog(50) As Single

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118/1980, Projeto e execução de obras de concreto armado.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6118:2001-Texto de discussão, Projeto de estruturas de concreto.*

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7187/1987, Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido.*

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7197/1989, Projeto de estruturas de concreto protendido.*

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7483/1990, Cordoalhas de aço para concreto protendido.*

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8681/1984, Ações e segurança nas estruturas.*

APARICIO, A. C., CASAS, J. R. e RAMOS, G. *Computer aided design of prestressed concrete highway bridges.* Computers & Structures, vol.60, nº 6, pp. 957 – 969, Great Britain, 1996.

CHOLFE, Luiz. *Concreto protendido - teoria 1 e teoria 2, notas de aula.* Escola de Engenharia da Universidade Mackenzie, São Paulo, 1999.

CHOLFE, Luiz e BONILHA, Luciana A. S. *Concreto protendido - prática 1 e prática 2, notas de aula.* Escola de Engenharia da Universidade Mackenzie, São Paulo, 1999.

DUARTE, Evandro P. *Projeto e calculo de uma viga isostática de concreto protendido*. Mac Protensão e Cia. Siderúrgica Belgo Mineira, Rio de Janeiro, 1995.

FUJII, Issao / Belgo Bekaert Arames S.A. *Relaxação das cordoalhas para protensão*. Comunicação pessoal, 2002.

GERE, James M. e WEAVER Jr., William. *Análise de estruturas reticuladas*. Editora Guanabara S.A., Rio de Janeiro, 1987.

LA ROVERE, Henriette Lebre. *Análise matricial de estruturas, notas de aula*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

LEONHARDT, Fritz. *Construções de concreto, vol.5*. Editora Interciência Ltda., Rio de Janeiro, 1983.

LORIGGIO, Daniel D. *Tópicos especiais de concreto protendido, notas de aula*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

MICROSOFT PRESS. *Microsoft Visual Basic 6.0 - Guia do Programador*. Makron Books, São Paulo, 1999.

NILSON, Arthur H. *Design of concrete structures, 12th. edition*. McGraw-Hill, Singapore, 1997.

PFEIL, Walter. *Concreto protendido, vol.1, 2º edição*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1988.

PFEIL, Walter. *Concreto protendido, vol.2, 2º edição*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1983.

PFEIL, Walter. *Concreto protendido, vol.3*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1984.

PONTES, Vagner Martins. *Análise não-linear de estruturas externamente protendidas, dissertação de mestrado*. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2000.

RUDLOFF INDUSTRIAL LTDA. *O sistema Rudloff de protensão; ancoragens tipo Rudloff; projeto de peças protendidas; etc.* Disponível na Internet: http://www.rudloff.com.br/conteudo/texto/tx_concreto.html. Capturado em 17 de março de 2002.

SANTOS, Lauro Modesto dos. *Cálculo de concreto armado, vol.1, 1ª reimpressão*. Editora Edgar Blücher Ltda., São Paulo, 1977.

THIESEN, Juliano Roberto. *Representação da protensão por carregamentos equivalentes, dissertação de mestrado*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. *Manual prático para a correta utilização dos aços no concreto protendido em obediência as normas atualizadas*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1980.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. *O concreto no Brasil - recordes, realizações, história, vol.1, 2ª edição*. Editora Pini Ltda., São Paulo, 1992.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza e CÉSAR Jr., Kléos M. L. *Concreto protendido - fundamentos básicos e perdas de protensão, 4º edição, notas de aula*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.