

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO
EM SEÇÕES DE CONCRETO PROTENDIDO**

Thiago Pena Bortone

B739a Bortone, Thiago Pena.
Avaliação das tensões no estado limite de serviço em seções de concreto protendido [manuscrito] / Thiago Pena Bortone. – 2014. xxiv, 203 f., enc.: il.

Orientador: José Márcio Fonseca Calixto.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f.101-203.

Bibliografia: f. 98-100.

1. Engenharia de estruturas – Teses. 2. Concreto protendido – Teses. I. Calixto, José Márcio Fonseca, \d 1957-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"AVALIAÇÃO DAS TENSÕES NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO
EM SEÇÕES DE CONCRETO PROTENDIDO"**

Thiago Pena Bortone

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. José Márcio Fonseca Calixto
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Sebastião Salvador Real Pereira
DEES - UFMG

Prof. Dr. Aécio Freitas Lira
Lira & Lira Associados Ltda

Belo Horizonte, 03 de abril de 2014

Aos meus queridos pais, Mário e Raquel.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar saúde e força para seguir em frente nos momentos mais difíceis.

À minha mãe Raquel Moreira Pena Bortone pelo afeto e incentivos constantes ao longo de toda a minha caminhada e por escutar a leitura dos meus textos e apresentações mesmo sendo sobre temas que não são de seu interesse.

Ao meu grande mestre e exemplo profissional, meu pai Mário Sérgio Bortone, por sua presença, ensinamentos, sugestões e paciência durante nossas incansáveis conversas técnicas.

À minha namorada Ludmila Moreno de Carvalho que me apoiou incondicionalmente em todas as etapas, viagens, apresentações de trabalho e que realmente batalhou em todas as minhas lutas diárias.

Agradecimentos, também, ao meu orientador, professor José Márcio Fonseca Calixto, pela parceria, paciência e principalmente confiança em meu potencial.

Ao professor Sebastião Salvador Real Pereira, por sua colaboração nesta pesquisa, manifestada no incentivo ao tema da pesquisa, cessão de materiais para consulta, elaboração de trabalhos em conjunto e principalmente pela presença constante ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, pela amizade e incentivo.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e ao Departamento de Engenharia de Estruturas, pela disponibilização de material e suporte para a realização deste trabalho.

Enfim, a todos que contribuíram, cada um a seu modo, para que essa fase fosse superada com sucesso.

“Aprender é a única de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

Com a atual demanda de se executar construções cada vez mais eficientes, duráveis e esteticamente agradáveis, as soluções estruturais em concreto protendido têm crescido ao longo dos anos. Para atender a tal necessidade devemos entender o comportamento das peças sob o efeito das forças de protensão de modo a caracterizá-lo. Neste trabalho, aborda-se o problema de vigas de concreto protendido submetidas à pós-tração aderente no estado de serviço. A finalidade principal é a exposição de um modelo matemático baseado na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007) e em algumas prescrições do Código Modelo 1978 (CEB-FIP, 1978) capaz de avaliar as tensões em serviço bem como classificar a estrutura quanto ao grau de protensão segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007). Este modelo foi desenvolvido e implementado para computador empregando a linguagem orientada a objetos *Microsoft Visual Basic.NET*, capaz de realizar tais funções. Para comprovação da eficácia do modelo proposto e também como fator de avaliação das tendências normativas, exemplos teóricos e exemplos baseados em ensaios realizados foram utilizados como parâmetros de comparação de vários pontos do algoritmo. Nesta análise comparativa boa correlação foi encontrada. Ao final são feitas conclusões e discussões a respeito dos resultados obtidos, além de sugestões para trabalhos futuros dentro desta mesma área de pesquisa.

Palavras-chave: Concreto Protendido, Tensões em Serviço, Perdas Imediatas de Protensão, Perdas Diferidas de Protensão.

ABSTRACT

The worldwide demand for more efficient, durable and esthetically pleasing buildings has increased the use prestressed concrete over the past years. Thus, the behavior of the elements under the effect of prestressing forces must be understood in order to characterize it. In this scenario, the focus of this dissertation is the analysis, under service loads, of post-tensioning concrete beams with bonded strands. A mathematical model based on Brazilian standard NBR 6118 (ABNT, 2007) and in some prescriptions of the Model Code 1978 (CEB-FIP, 1978) is employed to evaluate the stresses in service as well as to classify the prestressing structural degree according to NBR 6118 (ABNT, 2007). This model was developed and implemented using an object-oriented programming language *Microsoft Visual Basic .NET*. The model was compared to experimental and theoretical results found in the literature. This comparative study was also used as benchmarks to various points of the algorithm. Conclusions are drawn at the end as well as suggestions for future research.

Keywords: Prestressed Concrete, Service State Stresses, Immediately Loss of Prestressing, Differed Loss of Prestressing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Concreto armado com barras de armadura pré-tracionadas.....	2
Figura 2.1 – Tipos de Aços para Protensão.....	7
Figura 2.2 - Diagrama Tensão-Deformação simplificado dos aços CP.	9
Figura 2.3 – Deformações no concreto.....	11
Figura 2.4 – Resistência característica a compressão do concreto (f_{ck}).	12
Figura 2.5 – Macaco hidráulico utilizado no processo de protensão.....	19
Figura 2.6 - Tipos principais de ancoragem e seus subtipos.	20
Figura 2.7 – Exemplos de ancoragens ativas (a) e passivas (b)	21
Figura 2.8 - Purgador e bainha metálica.....	22
Figura 2.9 – Perdas de protensão – Classificação quanto ao agente causador.	23
Figura 2.10 – Perdas de protensão – Classificação quanto a época de ocorrência.....	23
Figura 3.1 – Sistema cartesiano adotado.	25
Figura 3.2 – Regras para possível localização dos pontos de inflexão.....	26
Figura 3.3 – Regras para restrição da possível localização dos pontos de inflexão.....	26
Figura 3.4 – Fluxograma de obtenção do coeficiente “a” da equação do trecho genérico j.....	27
Figura 3.5 – Fluxograma de obtenção dos coeficientes “b” e “c” da equação do trecho genérico j.	27
Figura 3.6 – Fluxograma de determinação do comprimento desenvolvido do cabo.....	28
Figura 3.7 – Fluxograma para caracterização geométricas dos cabos de protensão.	29
Figura 3.8 – Diagrama de tensões com perda por atrito e cravação das ancoragens.....	35
Figura 3.9 – Fluxograma para o cálculo da perda por atrito na cravação das ancoragens.	36
Figura 3.10 – Diagrama do coeficiente β_f	49
Figura 3.11 - Diagrama do coeficiente β_s	51
Figura 3.12 – Perda por relaxação pura do aço sob tensão constante.	53
Figura 3.13 - Diagrama do coeficiente RT em função da temperatura para 51 anos.	54

Figura 3.14 - Fluxograma de determinação das perdas diferidas de protensão.....	58
Figura 5.1 – Vista lateral da passarela da rua Varginha, Belo Horizonte/MG.....	77
Figura 5.2 – Esquema da discretização longitudinal da passarela.....	78
Figura 5.3 – Deslocamentos da estrutura A.....	83
Figura 5.4 – Seção transversal típica no vão.	84
Figura 5.5 – Esquema da discretização longitudinal do viaduto.	85
Figura 5.6 – Deslocamentos da estrutura B.....	89
Figura 5.7 – Esquema da discretização longitudinal da viga.	90
Figura 5.8 – Esquema da discretização longitudinal da estrutura.	91
Figura 5.9 – Seção transversal típica e posicionamento do cabo resultante.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Característica de alguns tipos de aço.....	10
Tabela 2.2 - Classes de Agressividade Ambiental (NBR 6118/2007).	13
Tabela 2.3 - Exigências das Classes de Agressividade Ambiental (NBR 6118/2007).....	13
Tabela 2.4 – Coeficientes de ponderação.	16
Tabela 2.5 - Níveis de Protensão.	17
Tabela 3.1 – Coeficientes de atrito.	32
Tabela 3.2 - Valores sugeridos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2007) para o coeficiente α_c	46
Tabela 3.3 – Valores de ψ_{1000} em porcentagem.	53
Tabela 4.1 – Descrição dos casos de carga.....	70
Tabela 4.2 – Limites de tensões.....	70
Tabela 5.1 – Comparação das perdas de tensão por retração e fluência na estrutura A.....	78
Tabela 5.2 – Comparação das perdas de tensão por relaxação do aço na estrutura A.	79
Tabela 5.3 – Comparação das tensões finais nas armaduras ativas na estrutura A.	80
Tabela 5.4 – Comparação dos esforços de protensão na estrutura A.	81
Tabela 5.5 – Comparação das tensões atuantes no concreto na estrutura A.	82
Tabela 5.6 – Verificação quanto a fissuração.....	83
Tabela 5.7 – Deslocamentos da estrutura A.	83
Tabela 5.8 – Comparação das perdas de tensão por retração e fluência na estrutura B.....	85
Tabela 5.9 – Comparação das perdas de tensão por relaxação do aço na estrutura B.....	86
Tabela 5.10 – Comparação das tensões finais nas armaduras ativas na estrutura B.	87
Tabela 5.11 – Comparação dos esforços de protensão na estrutura B.	87
Tabela 5.12 – Comparação das tensões atuantes no concreto na estrutura B.....	88
Tabela 5.13 – Verificação quanto a fissuração.....	88

Tabela 5.14 – Deslocamentos da estrutura B.	89
Tabela 5.15 – Comparação das perdas de tensões de protensão das vigas 1 e 2.	90
Tabela 5.16 – Comparação das tensões de protensão do viaduto após as perdas por atrito.	92
Tabela 5.17 – Comparação do comprimento de ancoragem e tensão instalada.	92
Tabela 5.18 – Comparação das perdas de tensão devido ao encurtamento elástico do concreto e tensão final na seção de simetria da estrutura.	92

LISTA DE SÍMBOLOS

A, B, C e D – Coeficientes da função β_r

A_c – Área da seção transversal da peça de concreto

A_{cb} – Coeficiente de atrito entre o cabo e a bainha

A_{cil} – Área do cilindro do equipamento de protensão

a_{ij} – Elementos da matriz de flexibilidade da estrutura (válido para $j \neq 0$ e $i \geq 0$)

a_j – Coeficiente da equação polinomial de 2º grau

$a_{(th)}$ – Coeficiente em função do tempo t_h

$AncDir$ – Abscissa do ponto onde o escorregamento da ancoragem da direita não provoca mais perdas de tensão

$AncEsq$ – Abscissa do ponto onde o escorregamento da ancoragem da esquerda não provoca mais perdas de tensão

$AngDir$ – Ângulo no ponto final do trecho analisado

$AngEsq$ – Ângulo no ponto inicial do trecho analisado

$AngHor$ – Variação angular horizontal do cabo

A_r, B_r, C_r, D_r e E_r – Coeficientes da função β_s

B_i – Elementos do vetor de deslocamentos e/ou rotações da estrutura (= a_{i0})

b_j – Coeficiente da equação polinomial de 2º grau

$b_{(t_h)}$ – Coeficiente em função do tempo t_h

C – Coeficiente de *Simpson* (1 para seções extremas, 2 para seções de número par e 4 para seções de número ímpar)

C_{Anc} – Comprimento de ancoragem do cabo

CH_c – Comprimento horizontal do cabo

c_j – Coeficiente da equação polinomial de 2º grau

$CmpPrb$ – Comprimento desenvolvido do trecho estudado

E_c – Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto

E_{c28} – Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto aos 28 dias

$E_{c(t)}$ ou $E_{c(t_0)}$ – Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto nos instantes t e t_0 respectivamente

E_{ip} – Esforços iniciais de protensão

E_{hip} – Esforços hiperestáticos iniciais de protensão

E_{fp} – Esforços finais de protensão

E_{hfp} – Esforços hiperestáticos finais de protensão

E_p – Módulo de elasticidade do aço de protensão

f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias

f_{ckj} – Resistência característica à compressão do concreto aos j dias

$f_{ctk,inf}$ – Resistência característica inferior à tração do concreto

$f_{c(t_0)}/f_{c(t_\infty)}$ – Função do crescimento da resistência do concreto com a idade

$F_{d,serv}$ – Solicitação de cálculo em serviço

$F_{gi,k}$ – Valor característico das ações permanentes

f_k – Resistência característica

f_{km} – Resistência característica média

$F_{q1,k}$ – Valor característico da ação variável admitida como principal para a combinação considerada

$F_{qj,k}$ – Valor característico de uma ação variável

f_{ptk} – Resistência característica à tração da armadura ativa

f_{pyk} – Resistência característica ao escoamento convencional da armadura ativa

$f(x)_j$ – Função polinomial do 2º grau que descreve a posição do cabo de protensão no trecho j

G_c – Módulo de elasticidade transversal do concreto

h_{fic} – Espessura fictícia da peça de concreto

I_c – Momento principal de inércia à flexão em torno do eixo de flexão da peça de concreto;

j – Instante de avaliação da propriedade do concreto, em dias

J_c – Momento principal de inércia à torção da peça de concreto

k – Coeficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo

K – Coeficiente de forma para cisalhamento

l – Comprimento do cabo de protensão; Comprimento do elemento estudado

M_0 – Momento fletor inicial ou final na seção devido à protensão (M_i para $i=0$)

M_e - Momento fletor devido aos carregamentos externos

M_{ei} - Momento fletor devido aos carregamentos externos na seção i

M_{fp} - Momento fletor final de protensão

M_{g1} – Momento fletor devido ao peso próprio da estrutura

M_{g2} – Momento fletor devido ao peso próprio, porém, adicionado depois da execução da obra como, por exemplo, guarda-rodas de pontes rodoviárias

M_{hip} - Momento fletor hiperestático inicial de protensão

M_{hfp} - Momento fletor hiperestático final de protensão

M_i ou M_j – Momento fletor na seção, devido ao esforço unitário aplicado na direção do hiperestático i ou j (valido para $i > 0$ e $j \neq 0$)

M_{ip} - Momento fletor inicial de protensão

$M_{m\acute{a}x}$ – Momento fletor máximo devido as cargas móveis

$M_{m\acute{i}n}$ – Momento fletor mínimo devido as cargas móveis

M_{si} – Momento fletor solicitante total na seção genérica i

M_{se} – Momento fletor gerado pela solicitação externa na seção genérica i

m_x – Momento fletor causado pelo esforço virtual unitário aplicado no ponto de abscissa x

m_{xi} – Momento fletor causado pelo esforço virtual unitário na seção i

M_{xa} – Momento fletor atuante na seção genérica de abscissa x_a

$M_{x,ip}$ – Momento fletor inicial de protensão na seção de abscissa genérica x_a

$M_{x,fp}$ – Momento fletor final de protensão na seção de abscissa genérica x_a

n – Relação entre os módulos de elasticidade longitudinal do aço de protensão e do concreto

N_0 – Esforço axial inicial ou final na seção devido à protensão (N_i para $i=0$)

n_a – Número de dados da amostra

n_{cabos} – Número de cabos de protensão existentes na seção analisada

N_i ou N_j – Esforço axial na seção, devido ao esforço unitário aplicado na direção do hiperestático i ou j (valido para $i > 0$ e $j \neq 0$)

N_{ip} - Esforço normal inicial de protensão

N_{fp} - Esforço normal final de protensão

N_s – Número total de seções

N_{x_a} – Esforço axial atuante na seção genérica de abscissa x_a

$N_{x,fp}$ – Esforço axial final de protensão na seção de abscissa genérica x_a .

P_{am} – Perda de atrito por metro (perda parasitária)

P_i – Força aplicada na armadura de protensão

$P_{máx}$ – Força aplicada pelo macaco hidráulico no cabo

$Q_{x,ip}$ – Esforço cortante inicial de protensão na seção de abscissa genérica x_a

$Q_{x,fp}$ – Esforço cortante final de protensão na seção de abscissa genérica x_a

$R_{(th,T)}$ – Perda de tensão por relaxação expressa em porcentagem

s – Coeficiente em função do tipo de cimento usado no concreto estrutural

t – Idade fictícia do concreto no instante considerado

t_h – Tempo de ocorrência da relaxação em horas

T_0 – Esforço de torção inicial ou final na seção devido à protensão (T_i para $i=0$)

t_0 – Idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento

t_{ef} – Idade real do concreto em dias

T_{amb} – Temperatura média diária do ambiente, em graus Celsius

T – Temperatura média diária do ambiente, em graus Celsius

T_i ou T_j – Esforço de torção na seção, devido ao esforço unitário aplicado na direção do hiperestático i ou j (valido para $i > 0$ e $j \neq 0$)

T_{vt} – Taxa de variação de tensão

U – Umidade relativa do ar, em porcentagem

u_{ar} – Perímetro externo da peça em contato com o ar

V_0 – Esforço cortante inicial ou final na seção devido à protensão (V_i para $i=0$)

$VarAng$ – Variação angular vertical do trecho analisado

V_i ou V_j – Esforço cortante na seção, devido ao esforço unitário aplicado na direção do hiperestático i ou j (valido para $i > 0$ e $j \neq 0$)

V_{g1} – Momento fletor devido ao peso próprio da estrutura

V_{g2} – Momento fletor devido ao peso próprio, porém adicionado depois da execução da obra como, por exemplo, guarda-rodas de pontes rodoviárias

$V_{\text{máx}}$ – Momento fletor máximo devido as cargas móveis

$V_{\text{mín}}$ – Momento fletor mínimo devido as cargas móveis

\bar{x} – Média aritmética simples

x_a – Abscissa do ponto analisado

x_i – Abscissa do ponto genérico i

X_i – Elementos do vetor de reações de apoio hiperestáticas da estrutura

x_{in} – Abscissa inicial do cabo

$x_i', y_i', I_{ga}, R_{di}, R_{df}$ – Variáveis auxiliares para o cálculo do comprimento desenvolvido

x_{fi} – Abscissa final do cabo

x_m – Abscissa média do cabo

x_w – Dado genérico da amostra

Y_{cab} – Ordenada do cabo na seção de abscissa genérica x_a

Y_{cg} – Distância do centro de gravidade da seção de abscissa genérica x_a da borda superior

y_i – Ordenada do ponto genérico i

Y_i – Distância do centro de gravidade da seção transversal à borda inferior

Y_s – Distância do centro de gravidade da seção transversal à borda superior

α – Soma dos ângulos de desvio entre a ancoragem e o ponto de abscissa x , em radianos

α_c – Coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento

α_p – Relação entre os módulos de elasticidade do concreto no instante da aplicação da força de protensão e do aço de protensão

β_d – Coeficiente de deformação lenta reversível em função do tempo $(t-t_0)$ decorrido após o carregamento

$\beta_{f(t)}$ ou $\beta_{f(t_0)}$ – Coeficiente de deformação lenta irreversível

$\beta_{s(t)}$ ou $\beta_{s(t_0)}$ – Coeficiente relativo a retração em função da espessura fictícia da peça e idade do concreto

γ_U – Coeficiente dependente da umidade relativa do ar

γ – Coeficiente de ponderação para cargas

δ – Escorregamento do dispositivo de ancoragem

δ_x – Deslocamento vertical do ponto de abscissa x

Δ_{anc} – Perda de tensão por escorregamento da ancoragem por metro

Δl – Alongamento do cabo de protensão

$\Delta_{pr(t,t_0)}$ – Perda de tensão por relaxação relativa do aço de protensão no intervalo t_0 a t

$\Delta t_{ef,i}$ – Período, em dias, durante o qual a temperatura média diária do ambiente T_i pode ser admitida constante

Δx – Distância entre duas seções consecutivas quaisquer de cada tramo

$\Delta\sigma_{atrito}$ – Perda de tensão de protensão devido ao atrito ao longo do cabo

$\Delta\sigma_{pr(t,t_0)}$ – Perda de tensão por relaxação pura do aço de protensão no intervalo t_0 a t

$\Delta\sigma_{p,cs}$ – Perda de tensão no aço de armadura ativa devido a retração e fluência do concreto

$\Delta\sigma_{p,csr}$ – Perda de tensão no aço de armadura ativa devido a retração e fluência do concreto e relaxação do aço de protensão

$\Delta\sigma_{px}$ – Perda por atrito no cabo na seção de abscissa x_a

$\Delta\sigma_{px,encurtamento}$ – Perda de tensão devido ao encurtamento elástico do concreto na seção de abscissa genérica x_a

ε_{1s} – Coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto.

ε_{2s} – Coeficiente dependente da espessura fictícia da peça

$\varepsilon_{cc(t,t_0)}$ – Deformação devido a fluência do concreto no intervalo de tempo t , t_0

ε_{cc} – Deformação por fluência do concreto

$\varepsilon_{c,el}$ – Deformação elástica do concreto

$\varepsilon_{c,s}$ – Deformação por retração do concreto

$\varepsilon_{cs(t,t_0)}$ – Deformação devido a retração do concreto no intervalo de tempo t , t_0

$\varepsilon_{cs\infty}$ – Valor final da retração

ε_p – Deformação específica da armadura ativa

μ – Coeficiente de atrito aparente entre o cabo e a bainha, em 1/radianos

ξ – Razão entre os resultados obtidos pela formulação exposta e os comparados

σ – Tensão normal

σ_a – Desvio padrão

σ_c – Tensão atuante na peça

σ_{cg} – Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devida à carga permanente mobilizada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão

σ_{cp} – Tensão inicial no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devida à protensão simultânea de n_{cabos}

σ_{cp0} – Tensão inicial no concreto, ao nível do cabo, devido apenas a protensão

σ_p – Tensão na armadura ativa

σ_{p0} – Tensão inicial no cabo, devido apenas a protensão

$\sigma_{p0,m\acute{a}x}$ – Tensão produzida pelo equipamento de protensão

$\sigma_{p0,min}$ – Tensão mínima no cabo após as perdas por atrito na seção de abscissa média

σ_{pi} – Tensão inicial na armadura de protensão

$\sigma_{pm\acute{a}x}$ – Tensão inicial de protensão

$\sigma_{pm,m\acute{a}x}$ – Tensão média no cabo de protensão

σ_{pr} – Tensão atuante no cabo para o cômputo da relaxação do aço

σ_{sup} – Tensão atuante na borda superior da seção transversal de concreto

$\sigma_{px,atrito}$ – Tensão máxima no cabo após a perda por atrito na seção de abscissa x_a

$\sigma_{px,instalada}$ – Tensão atuante no cabo após as perdas iniciais na seção de abscissa genérica x_a

$\sigma_{px,final}$ – Tensão no cabo após as perdas imediatas e diferidas na seção de abscissa genérica x_a

ϕ_{1c} – Parcela do coeficiente de deformação lenta irreversível que depende da umidade relativa do ar e da consistência do concreto

ϕ_{2c} – Parcela do coeficiente de deformação lenta irreversível que depende da espessura fictícia da peça

ϕ_a – Coeficiente de deformação rápida irreversível

$\phi_{d\infty}$ – Coeficiente de deformação lenta reversível

$\phi_{f\infty}$ – Coeficiente de deformação lenta irreversível em função da espessura fictícia da peça e umidade relativa do ar

$\phi_{(t,t_0)}$ – Coeficiente de fluência no intervalo de tempo t , t_0

ψ_{1j} ou ψ_1 – Coeficiente de ponderação da ação variável principal

ψ_2 – Coeficiente de ponderação da ação variável secundária

ψ_{1000} – Valor médio de relaxação medido após 1000h à temperatura constante de 20°C

ψ_j – Coeficiente de ponderação da carga acidental

$\psi_{(t,t_0)}$ – Coeficiente de intensidade da relaxação do aço no intervalo t_0 a t

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

BI – Borda inferior da seção transversal

BS – Borda superior da seção transversal

CAA – Classe de agressividade ambiental

CE – Combinação especial ou adicional de cargas

CEB/FIP - Comité Euro-International Du Béton/Fédération Internationale de la Précontrainte

CF – Combinação freqüente de ações

COV – Coeficiente de variação

CP – Concreto protendido; Cimento *Portland*; Combinação padrão

CQP – Combinação quase permanente de ações

CR – Combinação rara de ações

DER/MG – Departamento de estradas de rodagem do Estado de Minas Gerais

ELU – Estado limite último

ELU-AP – Estado limite último no ato da protensão

ELS – Estado limite de serviço

ELS-F – Estado limite de formação de fissuras

ELS-W – Estado limite de abertura de fissuras

ELS-DEF – Estado limite de deformações excessivas

ELS-D – Estado limite de descompressão

ELS-CE – Estado limite de compressão excessiva

FCA – Ferrovia Centro-Atlântica

RB – Relaxação baixa

RN – Relaxação normal

MCU – Método da carga unitária

NBR – Norma brasileira

PEAD – Polietileno de alta densidade

PTV – Princípio do trabalho virtual

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	X
SUMÁRIO	XXI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Histórico.....	1
1.2. Justificativa	3
1.3. Objetivo	4
1.4. Organização do Trabalho.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Aços para protensão.....	6
2.2. Concreto.....	10
2.2.1. Deformação por Retração do Concreto ($\epsilon_{c,s}$).....	10
2.2.2. Deformação Elástica do Concreto ($\epsilon_{c,el}$).....	11
2.2.3. Deformação por Fluência do Concreto (ϵ_{cc}).....	11
2.3. Prescrições da NBR 6118 (2007).....	12
2.3.1. Conceito de concreto protendido	12
2.3.2. Resistência característica dos materiais	12
2.3.3. Classe de Agressividade Ambiental (CAA).....	12
2.3.4. Estados Limites de Serviço	14
2.3.5. Combinações de Ações de Serviço	14
2.3.6. Níveis de protensão	16
2.3.7. Valores limite da força na armadura ativa por ocasião da operação de protensão..	17
2.3.8. Valores limite da força na armadura ativa ao término da operação de protensão...	17
2.4. Sistema de protensão com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior.....	17
2.4.1. Execução e posicionamento dos cabos de protensão	18
2.4.1.1. Montagem das formas e armação	18
2.4.1.2. Lançamento do concreto.....	18
2.4.1.3. Protensão	19
2.4.1.4. Ancoragem dos cabos.....	19
2.4.1.5. Injeção e acabamentos finais	21
2.5. Perdas de protensão no sistema com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior	22
3 METODOLOGIA DO MODELO MATEMÁTICO	24
3.1. Hipóteses.....	24
3.2. Posições dos cabos nas seções	25

3.3. Evolução da resistência característica a compressão do concreto	29
3.4. Evolução da resistência característica à tração do concreto	30
3.5. Evolução do módulo de elasticidade tangente inicial do concreto	30
3.6. Perdas imediatas no sistema de protensão com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior.....	31
3.6.1. Perdas por atrito	31
3.6.1.1. Perdas por atrito nos macacos hidráulicos e nas ancoragens.....	31
3.6.1.2. Perdas por atrito ao longo do cabo de protensão	31
a) Cabos protendidos por ambas as extremidades	33
b) Cabos protendidos pela extremidade esquerda.....	34
c) Cabos protendidos pela extremidade direita.....	34
3.6.1.3. Perdas na cravação das ancoragens	35
a) Cabos protendidos por ambas as extremidades	37
b) Cabos protendidos pela extremidade esquerda.....	38
c) Cabos protendidos pela extremidade direita.....	38
3.6.2. Perdas por deformação elástica	39
3.7. Tensão de protensão instalada	39
3.8. Esforços iniciais de protensão.....	40
3.9. Esforços hiperestáticos de protensão	41
3.9.1. Cálculo dos esforços hiperestáticos de protensão	41
3.9.2. Primeira regra de <i>Simpson</i>	44
3.10. Deformações diferidas do concreto	44
3.10.1. Idade fictícia do concreto	45
3.10.2. Espessura fictícia da peça.....	46
3.10.3. Deformação por fluência no concreto	47
3.10.3.1. Hipóteses básicas	47
3.10.3.2. Valor da deformação por fluência do concreto	47
3.10.4. Deformação por retração no concreto	50
3.10.4.1. Hipóteses básicas	50
3.10.4.2. Valor da deformação por retração do concreto	50
3.11. Relaxação do aço de protensão	52
3.11.1. Efeito da temperatura sobre a relaxação do aço de armadura ativa	53
3.12. Perdas diferidas no sistema de protensão com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior.....	55
3.12.1. Perdas diferidas devido a retração e fluência do concreto	55
3.12.2. Perdas diferidas devido a relaxação do aço de armadura ativa.....	56
3.12.3. Perdas diferidas totais	57

3.13. Tensão final de protensão	58
3.14. Esforços finais de protensão	58
3.15. Tensões finais atuantes no concreto, no sistema de protensão com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior	59
3.16. Deslocamentos da estrutura sob ação de cargas permanentes	59
4 ESPECIFICAÇÕES DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	62
4.1. Tipo de estrutura considerada	62
4.2. Dados de entrada.....	63
4.2.1. Dados gerais da estrutura	63
4.2.2. Dados dos apoios.....	64
4.2.3. Dados do concreto.....	64
4.2.4. Dados do aço de protensão e das condições do meio ambiente.....	64
4.2.5. Dados relativos aos grupos de cabos de protensão	65
4.2.6. Dados relativos às propriedades geométricas das seções transversais.....	65
4.2.7. Dados relativos às seções transversais	66
4.2.8. Dados relativos aos carregamentos	66
4.2.8.1. Envoltória de momentos fletores.....	66
4.2.8.2. Envoltória de esforços cortantes.....	67
4.2.9. Dados relativos às combinações adicionais	67
4.3. Consistência dos dados	68
4.4. Processamento	68
4.4.1. Combinação de ações padrão	69
4.4.2. Limites de tensões admissíveis	70
4.5. Resultados obtidos	71
4.5.1. Posição dos grupos de cabos e tensões atuantes na armadura ativa nas seções de projeto	71
4.5.2. Esforços de protensão	72
4.5.3. Tensões atuantes nas seções no concreto.....	72
4.5.4. Deslocamentos sob ação dos carregamentos permanentes	72
4.6. Pós-processamento (apresentação dos resultados).....	72
4.6.1. Visualização através da implementação computacional	73
4.6.2. Visualização por meio de relatório	73
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	74
5.1. Medidas de posição.....	74
5.1.1. Média aritmética simples de uma amostra	74
5.2. Medidas de dispersão.....	75
5.2.1. Desvio padrão de uma amostra	75
5.2.2. Coeficiente de variação	76

5.3. Descrição dos resultados apresentados	76
5.4. Resultados apartir da formulação de Pereira (1987).....	77
5.4.1. Estrutura A: 4 apoios.....	77
5.4.1.1. Perdas de tensões na armadura ativa devido à retração e fluência do concreto	78
5.4.1.2. Perdas de tensões na armadura ativa devido à relaxação do aço.....	79
5.4.1.3. Tensão final na armadura ativa.....	80
5.4.1.4. Esforços de protensão	81
5.4.1.5. Tensões atuantes no concreto	82
5.4.1.6. Exigências quanto a fissuração.....	83
5.4.1.7. Deslocamentos da estrutura	83
5.4.2. Estrutura B: 2 apoios	84
5.4.2.1. Perdas de tensões na armadura ativa devido à retração e fluência do concreto	85
5.4.2.2. Perdas de tensões na armadura ativa devido à relaxação do aço.....	86
5.4.2.3. Tensão final na armadura ativa.....	87
5.4.2.4. Esforços de protensão	87
5.4.2.5. Tensões atuantes no concreto	88
5.4.2.6. Exigências quanto a fissuração.....	88
5.4.2.7. Deslocamentos da estrutura	88
5.4.3. Conclusões	89
5.5. Ensaio de Lundqvist e Riihimäki (2010).....	90
5.5.1. Perdas de tensões totais na armadura ativa: Vigas 1 e 2	90
5.5.2. Conclusões	91
5.6. Resultados teóricos de Almeida et al. (2003)	91
5.6.1. Perdas de tensões na armadura ativa devido ao atrito do cabo com as bainhas.....	92
5.6.2. Comprimento de ancoragem e tensão instalada na extremidade do cabo	92
5.6.3. Perdas de tensão na armadura ativa devido ao encurtamento elástico do concreto e tensão final na seção de simetria da estrutura	92
5.6.4. Conclusões	92
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE A	101
APÊNDICE B	134
APÊNDICE C	150
APÊNDICE D	163
APÊNDICE E.....	176
APÊNDICE F.....	189

1

INTRODUÇÃO

1.1. Histórico

Ao longo dos tempos, a sociedade vem exigindo estruturas cada vez mais eficientes tanto em questão de suporte de cargas quanto em relação ao conforto em sua utilização. Por isso, o homem está sempre em busca de soluções no campo da engenharia para alcançar esses objetivos.

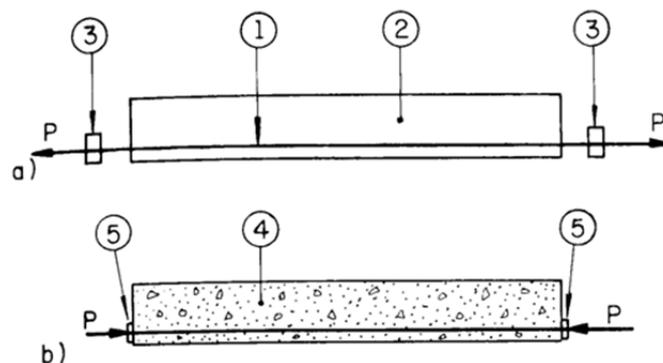
O primeiro grande passo, no campo das estruturas de concreto foi a utilização do concreto armado que, segundo Pfeil (1988), é por definição o material misto obtido pela colocação de barras de aço no interior do concreto. Nele, as armaduras são posicionadas dentro da forma antes do lançamento do concreto, obtendo-se assim uma peça de concreto armado.

Estas armaduras têm capital influência sobre a resistência última da estrutura, bem como sobre os fenômenos de deformações excessivas e aparecimento de fissuras. Porém a falta de conhecimento quanto aos modos de abordar o problema, principalmente a fissuração, atrasou em várias décadas o desenvolvimento do concreto armado, levando projetistas a usar tensões muito baixas nas armaduras tracionadas, limitando a capacidade de carga em serviço (PFEIL, 1984a).

As preocupações com a fissuração do concreto levou os engenheiros do início do século XX a utilizarem o artifício de pré-compressão de vigas, de modo que, sob as cargas em serviço a seção de concreto permanecesse toda comprimida e portanto, livre de fissuras.

Daí surgiu o conceito da protensão de estruturas que, segundo Pereira (1987), pode ser definido como o artifício de introduzir em uma estrutura um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento sob ação de diversas solicitações.

A pré-compressão era aplicada tracionando-se as barras de armadura antes da concretagem (Fig. 1.1a). Após o preenchimento das formas com concreto e decorrido um período de cura do mesmo, as barras eram ancoradas por meio de um conjunto formado de rosca e porca, em placas metálicas situadas na face das vigas, cortando-se o excesso de armadura ao final da operação (Fig. 1.1b).



Simbologia:

- a) Barras de armaduras tracionadas por meio de macacos hidráulicos atuando nos bancos de ancoragem;
 - b) Viga após a cura do concreto e cabos de protensão ancorados aplicando uma força P de compressão;
- 1 – Armadura de protensão;
 - 2 – Forma da viga;
 - 3 – Bancos de ancoragem;
 - 4 – Viga concretada;
 - 5 – Placa de ancoragem do cabo de protensão.

Figura 1.1 - Concreto armado com barras de armadura pré-tracionadas.

Fonte: Pfeil (1988).

Os ensaios de flexão de vigas pré-comprimidas revelaram excelente comportamento sem que a viga fissurasse sob as cargas de serviço. Porém, com a repetição da experiência, depois de decorridos alguns meses verificou-se que a melhora do comportamento havia desaparecido e a mesma estava se comportando da mesma forma que uma estrutura de concreto armado usual.

Este fato não foi compreendido na época devido ao pouco conhecimento acerca do efeito dos fenômenos de relaxação do aço, retração e fluência do concreto.

Em 1928, o engenheiro francês Eugène Freyssinet (LEONHARDT, 1983), não só fundamentou teoricamente os citados fenômenos como também criou um sistema capaz de comprimir a viga de maneira durável.

Em seus estudos, ele comprovou que os encurtamentos unitários no aço devido à retração e fluência, correspondiam a tensões de 15 a 25 KN/cm², o que explicava o desaparecimento do efeito da pré-compressão das vigas visto que as armaduras eram tracionadas a tensões de ordem de 10 a 12 KN/cm². Freyssinet então passou a utilizar fios de aço trefilado, que trabalhavam com tensões iniciais da ordem de 100 KN/cm²; com o passar do tempo restava uma tensão de compressão permanente de 75 a 85 KN/cm².

1.2. Justificativa

A utilização do concreto protendido nas estruturas tem crescido ao longo dos anos principalmente advinda da demanda de se executar construções cada vez mais eficientes, duráveis e esteticamente agradáveis.

Em contrapartida, ainda hoje é escassa a gama de implementações computacionais compreendendo esse tipo de material e as poucas existentes constituem patrimônio de empresas comerciais o que restringe sua disponibilidade.

Como já é sabido, para todo e qualquer projeto de estruturas é necessário atender os critérios de dimensionamento tanto dos estados limites últimos, que determinam a segurança à ruptura da peça, quanto dos estados limites de serviço que garantem seu adequado funcionamento para as cargas correntemente aplicadas sobre ela.

Porém, para estruturas de concreto protendido são necessários inúmeros cálculos, por muitas vezes iterativos que despendem muito tempo quando efetuados manualmente. Assim, com o desenvolvimento de sistemas de computador e da matemática computacional é possível

elaborarmos programas computacionais ou em um primeiro caso, algoritmos para realizar cálculos complexos e laboriosos com alta precisão numérica em relativamente pouco tempo de processamento.

Considerando a importância da aferição das tensões iniciais e finais decorrentes da protensão para o comportamento estrutural de peças de concreto protendido e, levando em conta que o fator tempo é de grande importância para os projetos de engenharia, faz-se valer a proposta do trabalho.

1.3. Objetivo

A finalidade principal é a sugestão de um modelo matemático para modelos lineares de concreto protendido com pós-tração aderente baseado na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007) e no Código Modelo 1978 (CEB-FIP, 1978) capaz de avaliar as tensões em serviço em qualquer tempo.

Como objetivos específicos, este trabalho busca gerar uma implementação computacional, desenvolvida na linguagem orientada a objetos *Microsoft Visual Basic .NET*, com a finalidade de auxiliar a verificação, em serviço, de estruturas de concreto protendido.

Para comprovação da efetividade do modelo proposto, exemplos de projetos executados e resultados de ensaios realizados serão utilizados como parâmetros de comparação de vários pontos do algoritmo.

1.4. Organização do Trabalho

Os capítulos deste trabalho estão organizados em uma seqüência lógica de idéias de forma a possibilitar um melhor entendimento sobre todo o conteúdo do mesmo.

No presente capítulo foi apresentado um breve histórico sobre o início do concreto protendido e suas dificuldades iniciais seguido pela justificativa do estudo e seu objetivo.

No capítulo 2, constam as revisões bibliográficas sobre o tema em questão dando enfoque para as definições gerais sobre as estruturas de concreto protendido, seus comportamentos e seu respectivo tratamento normativo.

No capítulo 3, são expostas a metodologia e os métodos matemáticos sugeridos pelas normas de projeto e adotados na elaboração deste documento.

No capítulo 4, são expostas de forma explicativa e em alguns casos, na forma de fluxograma, a especificação da implementação computacional desenvolvida com base nas formulações apresentadas.

No capítulo 5, são apresentadas de maneira concisa a análise dos resultados obtidos através da comparação de exemplos de estruturas já executadas e de ensaios realizados que servirão como parâmetros de medição da efetividade do algoritmo proposto.

O capítulo 6 é destinado às conclusões, considerações finais e propostas para futuros trabalhos. Por fim, constam os apêndices com os relatórios de cálculos efetuados pela implementação computacional de onde foram retirados os dados para análise dos resultados.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo deste capítulo são apresentadas revisões bibliográficas relativas aos temas abordados neste documento. Inicia-se tal revisão literária com a exposição dos conceitos, comportamentos e tipos de materiais utilizados em estruturas de concreto protendido. Em seqüência, o texto aborda conceitos normativos relativos às estruturas. Para finalizar é caracterizado o sistema de protensão com uso de cordoalhas aderentes pós-tracionadas que será objeto do tratamento matemático.

2.1. Aços para protensão

Os aços atualmente utilizados e fabricados para uso em estruturas de concreto protendido, também chamados de armaduras ativas, podem ser divididos em três grandes grupos representados na Fig. 2.1:

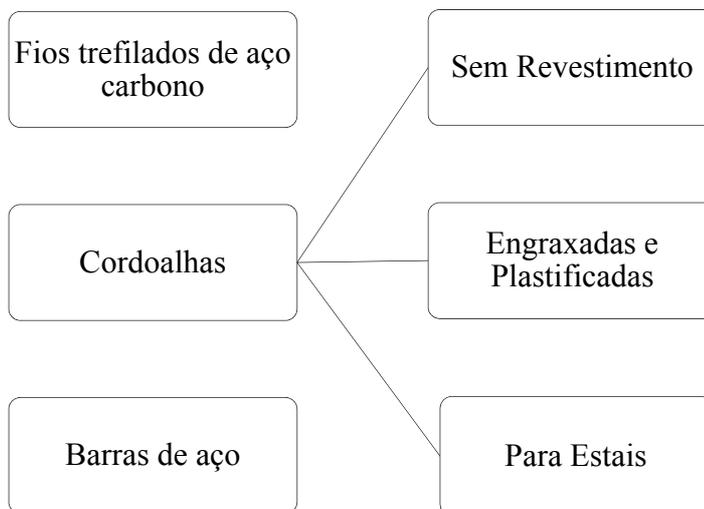


Figura 2.1 – Tipos de Aços para Protensão.

Suas características principais são (SCHMID, 2008):

- Fios trefilados de aço carbono:
 - Diâmetro máximo de 12 mm;
 - Fornecidos em rolos ou bobinas;
 - Resistência aumentada devido ao encruamento do aço;
 - Resistências mais elevadas para menores diâmetros.
- Cordoalhas sem revestimento:
 - Fios enrolados em forma de hélice;
 - Comumente em 3 a 7 fios;
 - Aço de protensão aderente.
- Cordoalhas com revestimento:
 - Fios enrolados em forma de hélice;

- Comumente em 3 a 7 fios;
- Uso de graxa e capa de PEAD (polietileno de alta densidade);
- Aço de protensão não aderente.
- Cordoalhas para estais:
 - Produzidas com 3 camadas protetoras à corrosão;
 - Fios galvanizados a quente;
 - Uso de capa plástica resistente a raios ultravioleta;
 - Aço de protensão não aderente.
- Barras de Aço:
 - Peças retilíneas de comprimento limitado;
 - Aço laminado a quente;
 - Diâmetro superior a 12mm.

Podemos também classificar os aços de protensão quanto a relaxação que, segundo Pereira (1987), é o fenômeno da perda de tensão sob deformação imposta constante. Os dois tipos são definidos como aço de relaxação baixa (RB) e aço de relaxação normal (RN).

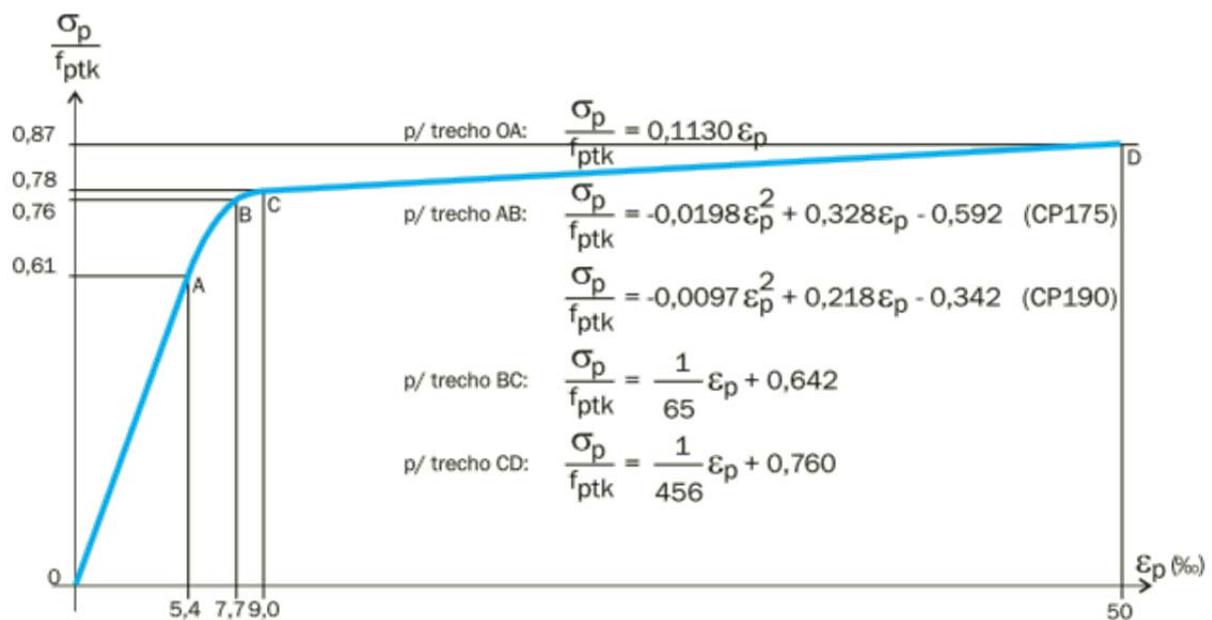
Até 1974, segundo Schmid (2008), eram fabricados no Brasil somente aços de protensão de relaxação normal (RN), também chamados aços aliviados. Estes aços são retificados por um tratamento térmico que alivia tensões internas de trefilação: os fios são passados em chumbo derretido entre 250 e 500°C, o que resulta na melhora da linearidade do diagrama Tensão x Deformação.

Contudo, o fio de aço tracionado tende a ceder com o tempo e conseqüentemente perder parte da tensão introduzida com a protensão, fenômeno conhecido como relaxação. Parte desta relaxação pode ser provocada propositalmente durante o alívio das tensões, elevando-se a temperatura entre 350 e 400°C e provocando um alongamento no fio de aproximadamente 1%. Esta etapa é conhecida como estabilização e os aços produzidos e sujeitos a este tratamento termomecânico são denominados estabilizados ou de relaxação baixa (RB).

Os aços utilizados atualmente para a protensão caracterizam-se por suas elevadas resistências e pela ausência de um patamar de escoamento.

Em se tratando de cordoalhas, que é objeto de estudo desse trabalho, sua designação se dá pelas letras CP (concreto protendido) seguidas da resistência característica à tração (f_{ptk}) em kgf/mm^2 e, indicação sobre sua relaxação RN (relaxação normal) ou RB (relaxação baixa).

A curva tensão-deformação dos principais aços utilizados no detalhamento de projetos de estruturas protendidas é apresentada na Fig.2.2 a seguir:



Simbologia:

σ_p – Tensão na armadura ativa;

ε_p – Deformação específica da armadura ativa.

Figura 2.2 - Diagrama Tensão-Deformação simplificado dos aços CP.

Fonte: Schmid (1993).

A resistência característica à tração dos tipos mais comuns de aços para concreto protendido é apresentada na Tab.2.1:

Tabela 2.1- Característica de alguns tipos de aço.

Designação	Tipo	Resistência Característica à Tração (f_{ptk}) - KN/cm ²
CP-105	Barra	105
CP-125	Barra	125
CP-150RN	Fio	150
CP-175 RN	Cordoalha	175
CP-175 RB	Cordoalha	175
CP-190 RN	Cordoalha	190
CP-190 RB	Cordoalha	190

2.2. Concreto

O concreto usual é constituído de quatro materiais: agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia), água e cimento portland. Os dois últimos constituintes formam um material pastoso que preenche a maior parte dos vazios entre os agregados e, quando esta pasta endurece, se forma um material sólido, que é denominado concreto.

É conhecido que, o comportamento estrutural do concreto varia sob o efeito do tempo e que, tais variações devem ser tomadas em conta principalmente em estruturas de concreto protendido. As principais parcelas contribuintes para a deformação total do concreto são as deformações por retração do concreto, por deformação elástica e por fluência do concreto.

2.2.1. Deformação por Retração do Concreto ($\epsilon_{c,s}$)

Segundo Pfeil (1983) denomina-se retração, a redução de volume do concreto provocada por perda de umidade por evaporação e/ou pela carbonatação do concreto (dissolução de cristais de hidróxido de cálcio, seguida da transformação em carbonato de cálcio).

O encurtamento total devido à retração depende de diversos fatores sendo os mais importantes: as dimensões do elemento estrutural, fator água/cimento, a umidade ambiente e a temperatura de exposição da obra.

Seu efeito inicia a partir do momento em que a água presente no concreto é consumida pelas reações químicas que ocorrem no mesmo sendo, o processo de cura com uso de água ou de produtos químicos, diminuidores de sua intensidade.

A seguir vê-se um gráfico tempo-deformação indicativo do efeito da retração do concreto (Fig. 2.3).

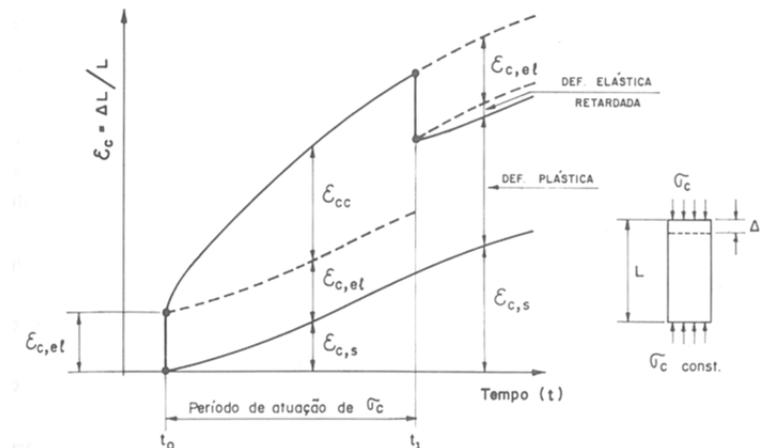


Figura 2.3 – Deformações no concreto.

Fonte: Pfeil (1983).

2.2.2. Deformação Elástica do Concreto ($\epsilon_{c,el}$)

A deformação elástica, como o próprio nome sugere, segue a Lei de *Hooke* onde, a tensão devido ao carregamento externo ou interno é proporcional à deformação específica e ao módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de *Young* do material constituinte.

Essa deformação é reversível sendo assim eliminada de maneira imediata após a remoção da solitação (Fig. 2.3).

2.2.3. Deformação por Fluência do Concreto (ϵ_{cc})

Segundo Pereira (1987), denomina-se fluência, o acréscimo de deformação de uma peça sob tensão imposta constante. A Fig. 2.3 ilustra o fenômeno: Quando um carregamento é aplicado no concreto, uma parte das tensões é absorvida pela água microscópica presente no concreto e o restante pelo esqueleto sólido do mesmo. Mantendo-se o carregamento por um longo período de tempo, as tensões absorvidas pela água são lentamente transferidas para o esqueleto do concreto aumentando assim sua deformação (PFEIL, 1988).

A fluência é um fenômeno parcialmente reversível o que significa que parte da deformação gerada por seu efeito é plástica.

O efeito da fluência depende de vários fatores, sendo os mais importantes: a idade do concreto na época do carregamento, a umidade ambiente, a temperatura ambiente e as dimensões do elemento estrutural (FERRAZ, 1958b).

2.3. Prescrições da NBR 6118 (2007)

2.3.1. Conceito de concreto protendido

De acordo com a referida norma brasileira, elementos de concreto protendido são: “Aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura e propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado limite último (ELU).” (ABNT, 2007, p.4)

2.3.2. Resistência característica dos materiais

Os valores de resistência característica dos materiais (Fig. 2.4) são definidos pela citada norma onde se conceitua: “Os valores característicos f_k das resistências são os que, num lote de material, têm uma determinada probabilidade de serem ultrapassados, no sentido desfavorável para a segurança (...) Para os efeitos desta Norma, a resistência característica inferior é admitida como sendo o valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido pelos elementos de um dado lote de material.” (ABNT, 2007, p.63).

Segundo essas premissas definem-se assim os valores de resistências características do concreto e do aço de armadura ativa.

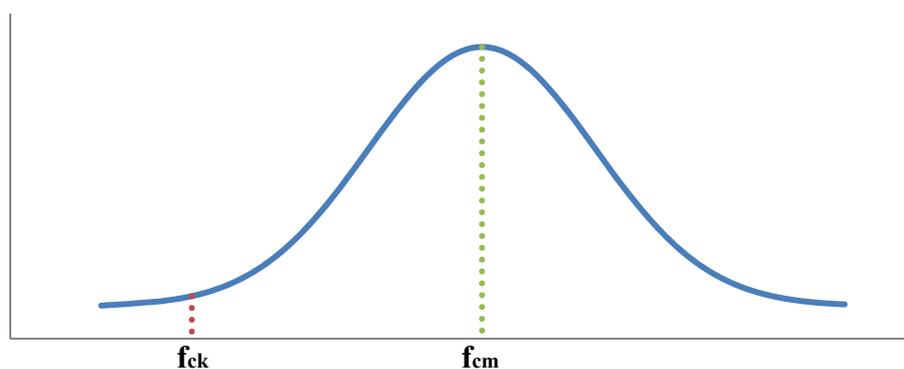


Figura 2.4 – Resistência característica a compressão do concreto (f_{ck}).

2.3.3. Classe de Agressividade Ambiental (CAA)

A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto independentemente das ações mecânicas ou outras previstas no dimensionamento estrutural (NBR 6118; ABNT, 2007).

As estruturas de concreto protendido assim como as de concreto armado são classificadas pela norma brasileira quanto ao tipo de ambiente a que estão expostas (Tab. 2.2).

Tabela 2.2 - Classes de Agressividade Ambiental (NBR 6118/2007).

CAA	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deteriorização da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1),2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1),2)}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{1),3)}	Elevado
		Respingos de maré	
1) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).			
2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.			
3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.			

Tal classificação gera requisitos mínimos a serem atendidos no campo do cobrimento da armadura de modo a evitar a corrosão da mesma e na qualidade do concreto (Tab. 2.3).

Tabela 2.3 - Exigências das Classes de Agressividade Ambiental (NBR 6118/2007).

Concreto	Classe de agressividade ambiental			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto ¹⁾ (ABNT NBR 8953)	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Cobrimento nominal (mm)	30	35	45	55
1) O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.				

2.3.4. Estados Limites de Serviço

De acordo com a norma brasileira NBR 8681 (ABNT, 2004), os estados limites de serviços são estados que por sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que são indícios de comprometimento da durabilidade da estrutura ou que não respeitam as condições especificadas para o uso corriqueiro da mesma.

Os estados limites de serviço previstos pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007) para estruturas de concreto protendido são:

- Estado Limite de Formação de Fissuras (ELS-F): Estado em que inicia a formação de fissuras. Admite-se que este estado é atingido quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a resistência à tração na flexão do concreto;
- Estado Limite de Abertura das Fissuras (ELS-W): Estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos permitidos;
- Estado Limite de Deformações Excessivas (ELS-DEF): Estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para sua utilização;
- Estado Limite de Descompressão (ELS-D): Estado no qual em um ou mais pontos da seção transversal a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção;
- Estado Limite de Compressão Excessiva (ELS-CE): Estado em que as tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido.

2.3.5. Combinações de Ações de Serviço

As combinações de ações de serviço são classificadas de acordo com sua permanência na estrutura e são definidas como:

- Quase Permanentes (CQP): “Combinações que podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, da ordem da metade deste período” (ABNT, 2004, p.2);
- Frequentes (CF): “Combinações que se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura, da ordem de 10^5 vezes em 50 anos, ou que tenham duração total igual a uma parte não desprezível desse período, da ordem de 5%” (ABNT, 2004, p.2);
- Raras (CR): “Combinações que podem atuar no máximo algumas horas durante o período de vida da estrutura” (ABNT, 2004, p.2).

Para o cômputo das solicitações devido às combinações descritas anteriormente procede-se segundo as Eqs. (2.1) a (2.3) abaixo com os coeficientes de ponderação sugeridos pela NBR 8681 (ABNT. 2004) descritos na Tab. 2.4:

$$(CQP)F_{d, serv} = \sum F_{gi,k} + \sum \Psi_{2j} \times F_{qj,k} \quad (2.1)$$

$$(CF)F_{d, serv} = \sum F_{gi,k} + \sum \Psi_1 \times F_{q1,k} + \sum \Psi_{2j} \times F_{qj,k} \quad (2.2)$$

$$(CR)F_{d, serv} = \sum F_{gi,k} + F_{q1,k} + \sum \Psi_{1j} \times F_{qj,k} \quad (2.3)$$

Simbologia:

$F_{d, serv}$ – Solicitação de cálculo em serviço;

$F_{gi,k}$ – Valor característico das ações permanentes;

$F_{qj,k}$ – Valor característicos de uma ação variável;

$F_{q1,k}$ – Valor característico da ação variável admitida como principal para a combinação considerada;

ψ_{1j} ou ψ_1 – Coeficiente de ponderação da ação variável principal;

ψ_2 – Coeficiente de ponderação da ação variável secundária.

Tabela 2.4 – Coeficientes de ponderação.

Ações		ψ_1	$\psi_2^{3),4)}$
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹ .	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ² .	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens.	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral.	0,3	0,0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local.	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarela de pedestres.	0,4	0,3
	Pontes rodoviárias.	0,5	0,3
	Pontes ferroviárias não especializadas.	0,7	0,5
	Pontes ferroviárias especializadas.	1,0	0,6
	Vigas de rolamentos de pontes rolantes.	0,8	0,5
1) Edificações residenciais, de acesso restrito.			
2) Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.			
3) Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.			
4) Para combinações excepcionais onde a ação principal for fogo, o fator de redução ψ_2 pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7.			

2.3.6. Níveis de protensão

Os níveis de protensão estão relacionados diretamente com o processo de fissuração da peça de concreto e conseqüentemente à vida útil da estrutura (CARVALHO, 2012). De maneira geral, quanto maior o nível de protensão menor será a abertura de fissuras na estrutura. Logo, este nível varia com a intensidade da força aplicada que por sua vez é função da proporção de armadura ativa em relação à passiva.

As estruturas de concreto protendido pós-tracionadas são classificadas em três níveis onde para cada um deles temos requisitos quanto a classe de agressividade ambiental (CAA), fissuração e combinações de ações, conforme a Tab. 2.5:

Tabela 2.5 - Níveis de Protensão.

Tipo de concreto estrutural	CAA e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2 \text{ mm}$	CF
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F ELS-D ¹⁾	CF CQP
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F ELS-D ¹⁾	CR CF

1) A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 25 \text{ mm}$.

2.3.7. Valores limite da força na armadura ativa por ocasião da operação de protensão

Para estruturas com armadura ativa pós-tracionada, a referida norma brasileira diz que: “por ocasião da aplicação da força P_i a tensão σ_{pi} da armadura de protensão na saída do aparelho de tração deve respeitar os limites $0,74 f_{ptk}$ e $0,87 f_{pyk}$ para aços da classe de relaxação normal, e $0,74 f_{ptk}$ e $0,82 f_{pyk}$ para aços da classe de relaxação baixa; Nos aços CP-85/105, fornecidos em barras, os limites passam a ser $0,742 f_{ptk}$ e $0,88 f_{pyk}$ respectivamente” (ABNT, 2007, p.43).

2.3.8. Valores limite da força na armadura ativa ao término da operação de protensão

Ao término da operação de protensão, a tensão na armadura devido a força aplicada sobre ela também não deverá ultrapassar os limites descritos no item anterior.

2.4. Sistema de protensão com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior

No sistema de protensão com cabos aderentes pós-tracionados, o pré-alongamento da armadura ativa (cordoalhas) é realizado após o endurecimento do concreto e, utiliza a estrutura como apoio.

Como os cabos são posicionados dentro de bainhas sem quaisquer ligações com a massa de concreto, no momento de seu tracionamento, eles podem se distender livremente, somente com o impedimento gerado pelo atrito com a bainha (FERRAZ, 1958a).

Somente após o preenchimento das bainhas por nata de cimento é que se processará a aderência entre os cabos de protensão e a estrutura fazendo com que além de aplicarem um esforço de compressão na estrutura, eles possam funcionar como armadura resistente a esforços de forma similar a uma armadura passiva.

O sistema de protensão com armadura pós-tracionada é constituído basicamente pelos cabos de protensão, suas ancoragens e o equipamento destinado ao tracionamento dos cabos.

2.4.1. Execução e posicionamento dos cabos de protensão

De maneira geral, as estruturas de concreto protendido executadas pelo sistema de protensão com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior seguem o seguinte roteiro:

2.4.1.1. Montagem das formas e armação

Nesta fase inicialmente são montadas as formas externas que garantirão as corretas características geométricas do elemento estrutural. Logo em seguida iniciam-se a colocação das armaduras passivas e o posicionamento das bainhas que irão receber os cabos de protensão.

As bainhas geralmente são feitas com chapas finas corrugadas, prevenindo assim o seu amassamento durante o processo construtivo, garantindo a correta posição do cabo dentro do elemento estrutural, proporcionando estanqueidade e permitindo tanto a colocação da armadura ativa antes da concretagem quanto depois dela (fiação posterior). O diâmetro das bainhas utilizadas depende do diâmetro do cabo de protensão usado.

2.4.1.2. Lançamento do concreto

Como o concreto é lançado sem que haja contato com a armadura ativa, devido ao fato de a mesma estar dentro da bainha metálica estanque ou em alguns casos nem estar presente (fiação posterior), não há neste instante a aderência entre as cordoalhas e o concreto justificando assim o nome de sistema de protensão com cabos pós-tracionados com aderência posterior.

2.4.1.3. Protensão

Nesta fase é aplicado o pré-alongamento das armaduras ativas com o uso dos equipamentos de protensão. Geralmente esse serviço é feito por empresas especializadas visto que não são usados equipamentos comuns e o controle da execução deve ser feita de forma rigorosa.

Durante o processo de tracionamento dos cabos é utilizada a própria estrutura de concreto como apoio do equipamento de protensão sendo assim, nesta etapa, o concreto já deve apresentar resistência mínimas adequadas para tal operação.

Basicamente, para se executar a operação de protensão em uma peça, o equipamento necessário é o macaco de protensão (Fig. 2.5). Ele é um dispositivo hidráulico para estiramento do cabo onde se controla, através de um manômetro de pressão, a força aplicada nas cordoalhas. Na medida em que o cabo é tracionado, são feitas medições do alongamento do mesmo para comparação com os dados de projeto. De acordo com Almeida et al. (2003) se houver diferenças entre esses valores e elas forem inferiores a 5% é liberada a protensão, caso contrário o projetista deverá ser consultado.



Figura 2.5 – Macaco hidráulico utilizado no processo de protensão.

Fonte: Protende.

2.4.1.4. Ancoragem dos cabos

Após a liberação da protensão, os cabos são fixados nos sistemas de ancoragens projetados e, realiza-se o corte da armadura.

Os sistemas de ancoragem dos cabos de protensão nos elementos estruturais compreendem dois tipos: ancoragens ativas e ancoragens passivas ou mortas (Fig. 2.6) e são os responsáveis por garantir a fixação dos cabos de protensão no ponto em que estão instaladas.

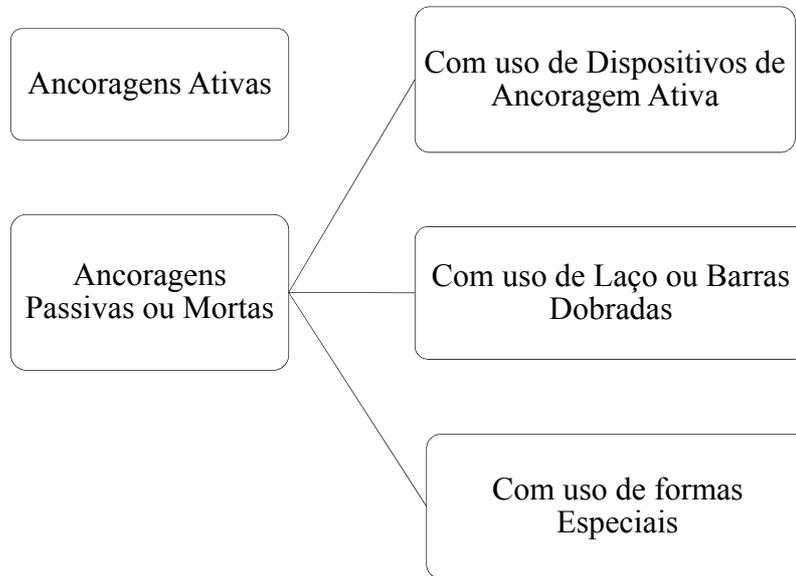


Figura 2.6 - Tipos principais de ancoragem e seus subtipos.

As ancoragens ativas (Fig. 2.7a) são aquelas por onde se faz o estiramento dos cabos e são colocadas nos pontos de saída dos mesmos. Sua localização deve ser escolhida de modo a permitir fácil acesso e posicionamento dos equipamentos de protensão (EMERICK, 2005).

De maneira geral, a fixação dos cabos nessas ancoragens é feita através do processo de encunhamento. Nesse processo, as cordoalhas são inicialmente separadas uma a uma. Quando no instante de tracionamento de cada cordoalha, a força de protensão determinada pelo projeto é atingida, cunhas são forçadas no furo de passagem das cordoalhas de modo a não deixá-las regredir a posição inicial.

Para o posicionamento das ancoragens ativas são feitos antes da concretagem, rebaixos nas faces dos elementos estruturais, chamados de nichos.

As ancoragens passivas ou mortas podem ser feitas pré-cravando os fios das cordoalhas, utilizando um dispositivo de ancoragem ativa ou com o uso de laços ou barras dobradas, ancorando os cabos por aderência dentro do corpo de concreto (Fig. 2.7b).

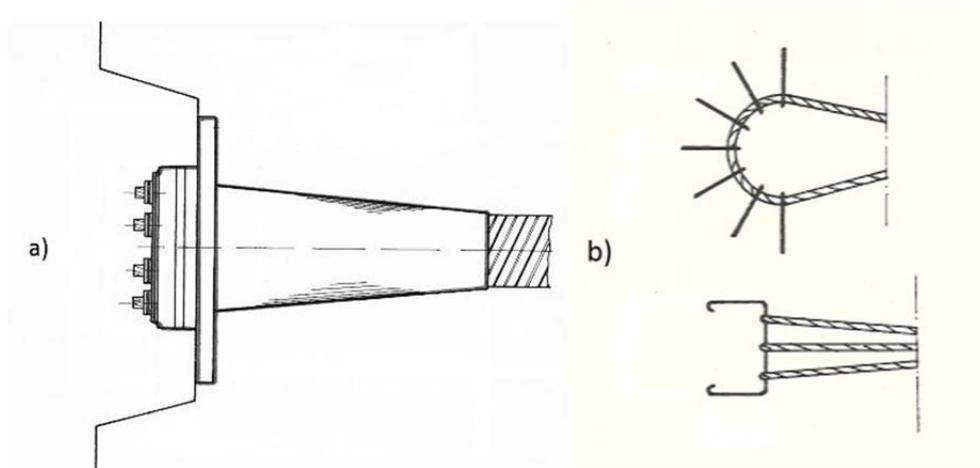


Figura 2.7 – Exemplos de ancoragens ativas (a) e passivas (b)

Fonte: Protende.

2.4.1.5. Injeção e acabamentos finais

Após a concretagem do elemento estrutural e a ancoragem dos cabos à estrutura, a bainha metálica contendo o cabo de protensão deve ser preenchida por graute ou por calda de cimento *Portland* sem uso de aditivos (ABNT NBR 6118, 2007). Isto garante uma proteção adicional à armadura contra a corrosão e estabelece a aderência entre o cabo e a peça de concreto.

Para atender a essas finalidades é necessário que ocorra o preenchimento total dos espaços vazios das bainhas pela nata de cimento sem que haja bolhas de ar ou água de segregação. Além disso, a nata não deve conter em sua composição elementos capazes de provocar corrosão do aço e, que após seu endurecimento, seja garantida elevada resistência (MACHADO, 1965)

O procedimento de preenchimento das bainhas é controlado por meio de purgadores instalados ao longo da peça. A saída desta nata pelos purgadores comprova o total preenchimento dos vazios da bainha (Fig. 2.8).

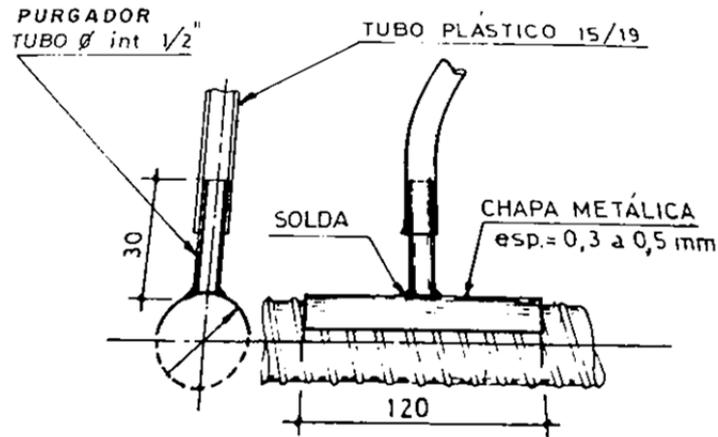


Figura 2.8 - Purgador e bainha metálica.

Fonte: Pfeil (1983).

Feito o preenchimento das bainhas contendo os cabos, parte-se para etapa final que são os acabamentos. Assim, os nichos criados para a operação de protensão da estrutura são preenchidos com concreto de forma a permitir um bom acabamento final da face da peça bem como promover uma maior proteção a corrosão da armadura protendida.

2.5. Perdas de protensão no sistema com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior

Segundo Pfeil (1983), denominam-se perdas de protensão todas as perdas verificadas nos esforços ou nas tensões aplicadas aos cabos de protensão.

As perdas podem ser classificadas quanto ao agente causador ou quanto à época de ocorrência (Figs. 2.9 e 2.10).

Quanto à época de ocorrência, denomina-se perdas imediatas as perdas que só dependem do sistema construtivo da obra e perdas diferidas são aquelas que são computadas de acordo com as propriedades dos materiais incorporados na estrutura (PFEIL, 1984).

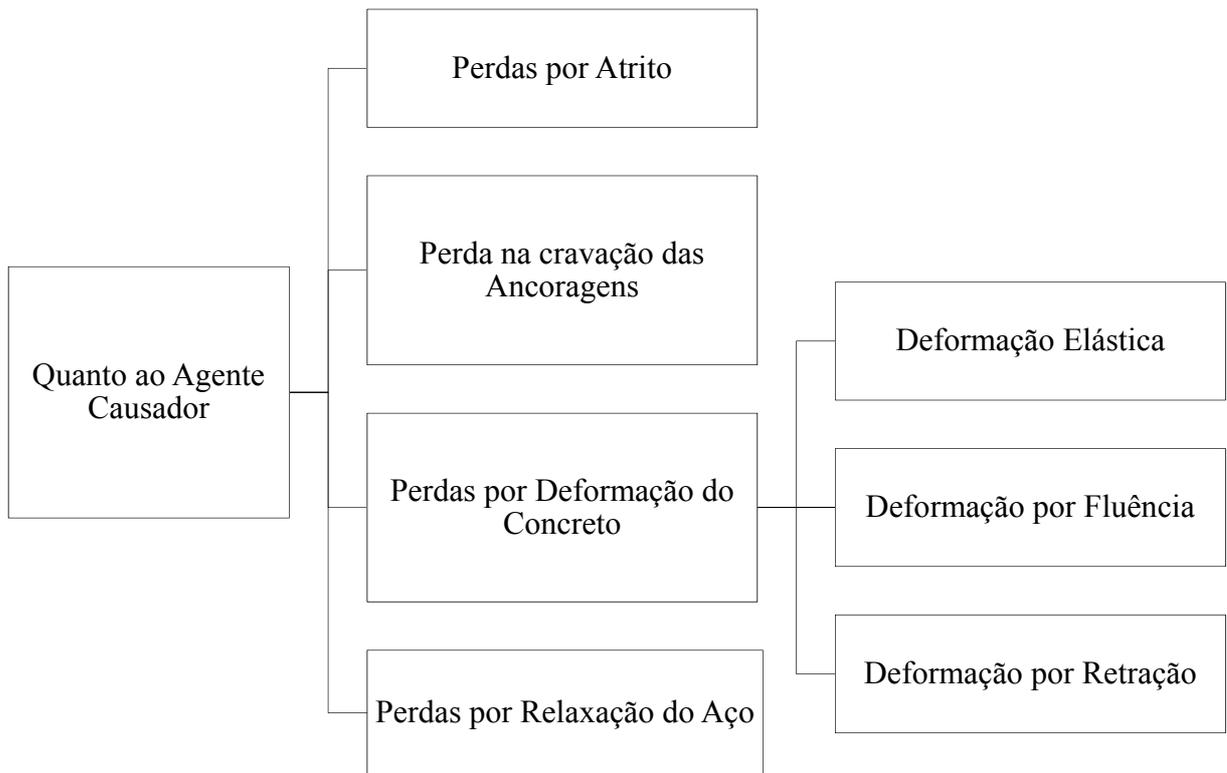


Figura 2.9 – Perdas de protensão – Classificação quanto ao agente causador.

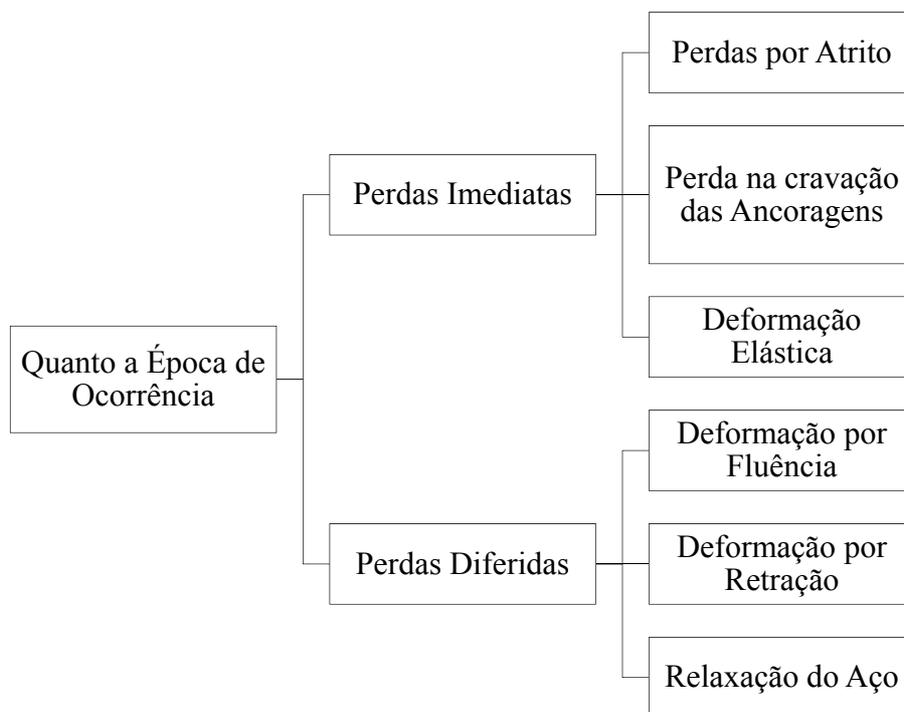


Figura 2.10 – Perdas de protensão – Classificação quanto a época de ocorrência.

3

METODOLOGIA DO MODELO MATEMÁTICO

Neste capítulo é apresentado o modelo matemático bem como suas hipóteses fundamentais e seus métodos de cálculo para computar os esforços e tensões tanto nas fases iniciais e finais quanto em qualquer tempo determinado em seções de elementos protendidos.

O modelo matemático exposto é em grande parte baseado na norma brasileira NBR-6118 (ABNT, 2007) e considera que a estrutura protendida é discretizada em um dado número de seções transversais que têm propriedades geométricas conhecidas e também que o número de cabos, área e geometria dos mesmos estão definidos.

3.1. Hipóteses

Todas as formulações aqui consideradas são válidas se satisfeitas as seguintes hipóteses:

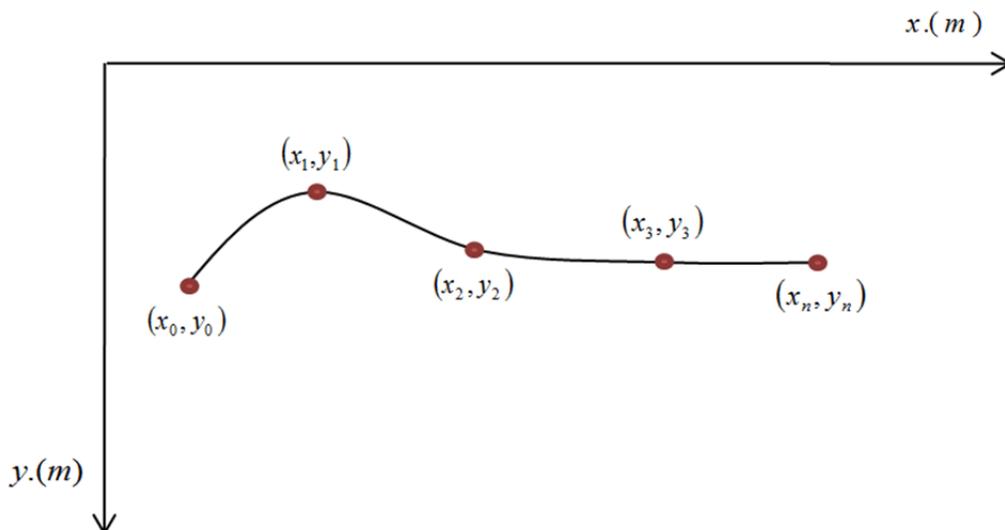
- O concreto utilizado na estrutura atende aos requisitos do grupo I de resistência conforme a classificação da NBR-8953 (ABNT, 2011);
- O endurecimento do concreto acontece em condições ambientes constantes e sob condições normais de cura não sendo válidas assim para cura a vapor;
- Existe uma perfeita aderência entre as barras de armadura e o concreto;
- A resistência a tração do concreto é considerada;
- A peça analisada permanece no estágio I;

- Os conceitos aqui expostos não são aplicáveis a concretos sujeitos a temperaturas extremamente altas (maiores do que 150°C) ou baixas (menores do que -20°C).

3.2. Posições dos cabos nas seções

Para se determinar o traçado do cabo e garantir que o mesmo seja suave e contínuo é necessário o conhecimento prévio (obtido, por exemplo, através de um pré-dimensionamento da estrutura) de pontos notáveis que, definirão trechos de cabos onde, sua posição é completamente definida.

Para inserção de tais pontos do cabo usou-se neste trabalho uma orientação de eixos cartesianos com origem na fibra superior da seção mais à esquerda do elemento em análise (Fig. 3.1). O sentido positivo do eixo das abscissas vai da esquerda para direita e do eixo das ordenadas de cima para baixo.



Simbologia:

x_i – Abscissa do ponto genérico i ;

y_i – Ordenada do ponto genérico i .

Figura 3.1 – Sistema cartesiano adotado.

Com a definição dos pontos notáveis por trecho, as ordenadas dos cabos nas seções do elemento estrutural são definidas considerando:

- Polinômios de 1º grau: apenas em trecho horizontais;

- Polinômios de 2º grau: demais casos.

Segundo essas premissas e visando um traçado suave (sem angulosidade) dos cabos estabeleceu-se que no caso de existir uma parábola no início do cabo, que não seja seguida de um ponto de inflexão, a mesma terá derivada primeira nula neste ponto sucessor. Caso ocorra uma parábola no final do cabo, antecedida de um ponto que não seja de inflexão, a mesma terá derivada primeira nula nesse ponto antecessor. Não acontecendo nenhum dos dois casos anteriores, teremos sempre trechos retos ou duas parábolas consecutivas que serão definidas através das abscissas de três pontos consecutivos cujas ordenadas do primeiro e terceiro ponto tenham derivadas primeiras nulas. Os valores da ordenada e da derivada primeira no ponto intermediário são iguais para as duas parábolas. Para que sejam verdadeiras as hipóteses acima teremos as restrições a seguir dadas pelas Figs. 3.2 e 3.3.

$$x_0 \geq 0$$

$$x_i > x_{i-1}, \text{ para } i > 0$$

$$y_i \text{ pode ser um Ponto de Inflexão se } \left[\begin{array}{l} i \neq 0 \\ \text{ou} \\ i \neq \text{Número de Trechos do cabo} \\ \text{ou} \\ y_{i-1} \neq \text{Ponto de Inflexão} \\ \text{ou} \\ y_{i+1} \neq \text{Ponto de Inflexão} \end{array} \right.$$

Figura 3.2 – Regras para possível localização dos pontos de inflexão.

$$y_i \text{ não deverá ser um Ponto de Inflexão se } \left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} i = 0 \\ \text{ou} \\ y_{i-1} = \text{Ponto de Inflexão} \\ \text{ou} \\ y_i = y_{i-1} \end{array} \right. \\ \text{e} \\ \left\{ \begin{array}{l} y_{i+1} = \text{Ponto de Inflexão} \\ \text{ou} \\ y_i = y_{i+1} \\ \text{ou} \\ i + 1 = \text{Número de Trechos do cabo} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Figura 3.3 – Regras para restrição da possível localização dos pontos de inflexão.

Com base nestes critérios e sabendo-se que a equação da parábola tem a forma descrita pela Eq. (3.1), chega-se na formulação exposta por Pereira (1987) para as equações de posição dos cabos de protensão de cada trecho j definido pelos pontos $i-1$ e i conforme Figs. 3.4 e 3.5:

$$f(x)_j = a_j x^2 + b_j x + c_j \quad (3.1)$$

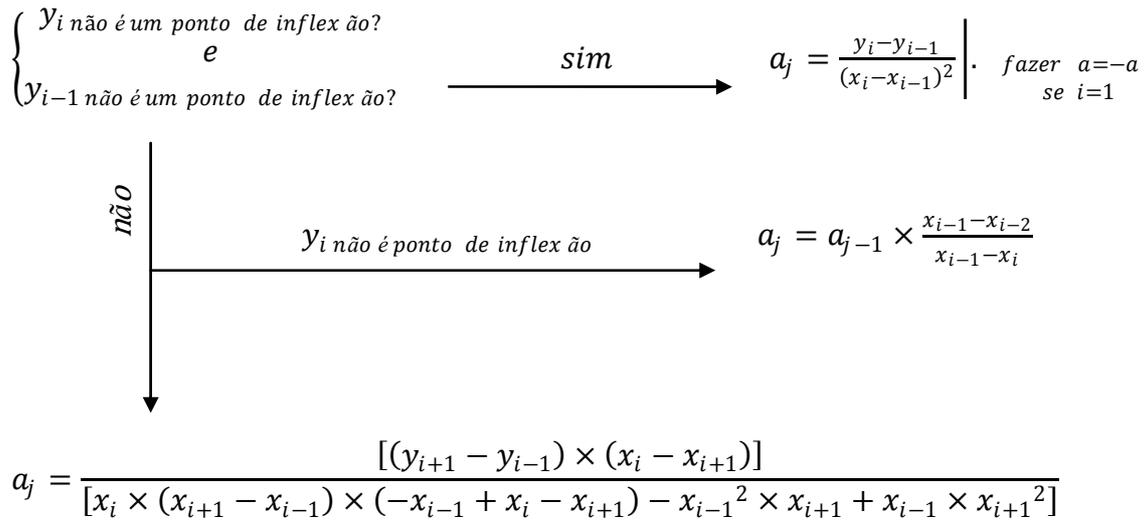


Figura 3.4 – Fluxograma de obtenção do coeficiente “a” da equação do trecho genérico j .

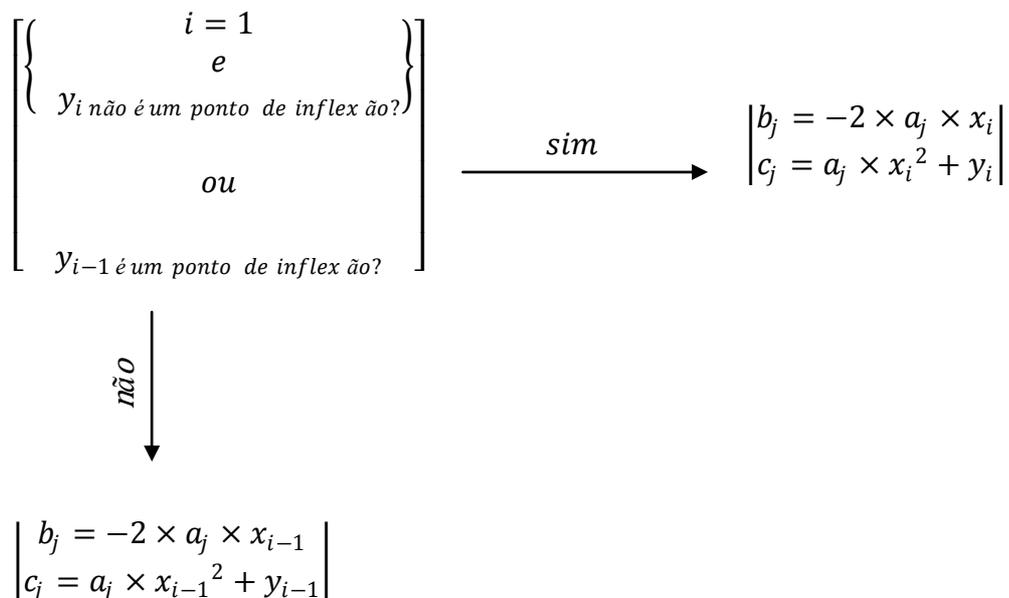


Figura 3.5 – Fluxograma de obtenção dos coeficientes “b” e “c” da equação do trecho genérico j .

Definidas assim as equações do desenvolvimento dos cabos basta calcular por meio das abscissas das seções definidas pelo usuário, as ordenadas da posição dos cabos de protensão bem como a variação angular de cada trecho dos mesmos. Tal variação angular é calculada também por trecho conforme Eqs. (3.2) a (3.4).

$$AngEsq = -arctan(2 \times a_{i-1} \times x_{i-1} + b_i) \quad (3.2)$$

$$AngDir = -arctan(2 \times a_i \times x_i + b_i) \quad (3.3)$$

$$VarAng = abs(AngEsq - AngDir) \quad (3.4)$$

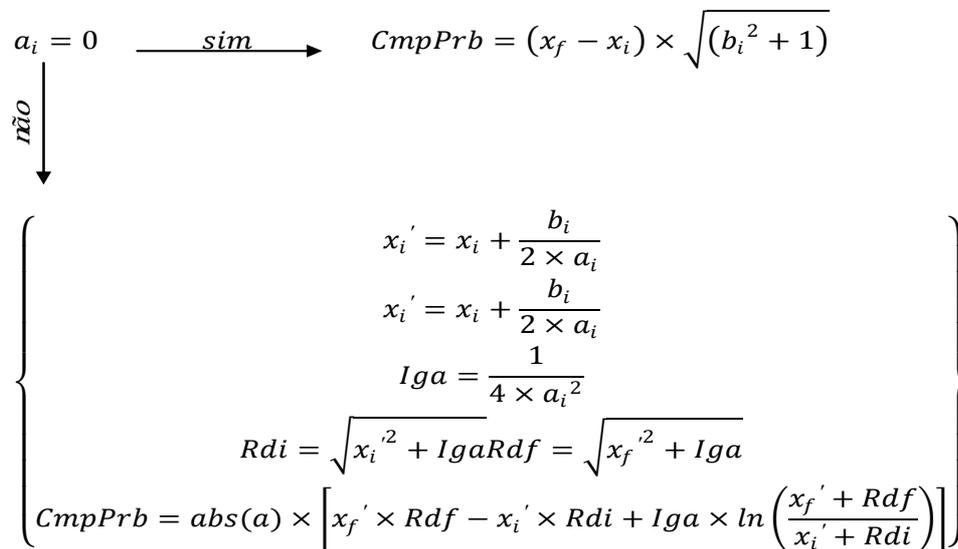
Simbologia:

AngEsq – Ângulo no ponto inicial do trecho analisado.

AngDir – Ângulo no ponto final do trecho analisado.

VarAng – Variação angular vertical do trecho analisado.

Estes valores serão utilizados na determinação do comprimento total do cabo (Fig. 3.6) bem como na avaliação das perdas de tensão por atrito entre o cabo e a bainha.



Simbologia:

CmpPrb – Comprimento desenvolvido do trecho estudado;

x_i' , y_i' , Iga , Rdi , Rdf – Variáveis auxiliares para o cálculo do comprimento desenvolvido.

Figura 3.6 – Fluxograma de determinação do comprimento desenvolvido do cabo.

Para se caracterizar geometricamente os cabos de protensão deve-se seguir por todas as etapas do fluxograma mostrado na Fig. 3.7. Vale lembrar que, os desvios angulares no plano horizontal (em planta) não foram aqui contemplados devendo ser somados, quando for necessário, ao desvio angular horizontal.

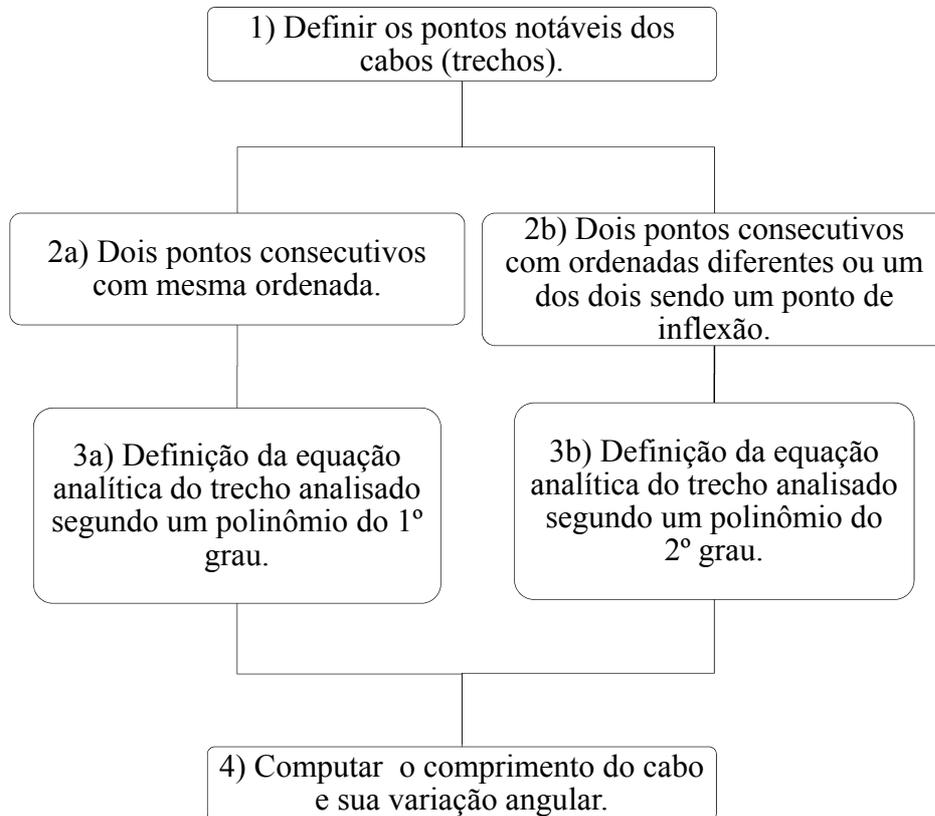


Figura 3.7 – Fluxograma para caracterização geométrica dos cabos de protensão.

3.3. Evolução da resistência característica a compressão do concreto

De acordo com a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007), para efeitos de projeto podemos considerar a resistência característica a compressão como sendo definida pela Eq. (3.5).

$$f_{ckj} = \begin{cases} e^{\left\{s \times \left[1 - \left(\frac{28}{t_{ef}}\right)^{0,5}\right]\right\}} \times f_{ck}, & j \leq 28 \text{ dias} \\ f_{ck}, & j > 28 \text{ dias} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$s = \begin{cases} 0,38 \text{ para concreto de cimento CIII e CPIV} \\ 0,25 \text{ para concreto de cimento CPI e CII} \\ 0,20 \text{ para concreto de cimento CPV – ARI} \end{cases}$$

Simbologia:

s – Coeficiente em função do tipo de cimento usado no concreto estrutural;

t_{ef} – Idade real do concreto em dias;

f_{ckj} – Resistência característica à compressão do concreto aos j dias;

f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias;

j – Instante de avaliação da propriedade do concreto, em dias;

Porém, de acordo com Cholfe e Bonilha (2013), na falta de elementos mais precisos, pode ser utilizada a equação válida para $j \leq 28$ dias para avaliar a relação de resistências características entre o concreto em uma certa idade e no tempo infinito ($f_{c(t_0)}/f_{c(t_\infty)}$) utilizada para o cálculo da deformação por fluência do concreto.

3.4. Evolução da resistência característica à tração do concreto

De acordo com a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007), pode-se considerar a resistência característica à tração como sendo definida pela Eq. (3.6).

$$f_{ctkj,inf} = \begin{cases} 0,21 \times f_{ckj}^{2/3}, & f_{ckj} > 7 \text{ MPa e } j \leq 28 \text{ dias} \\ 0,21 \times f_{ck}^{2/3}, & f_{ckj} > 7 \text{ MPa e } j > 28 \text{ dias} \end{cases} \quad (3.6)$$

Simbologia:

$f_{ctk,inf}$ – Resistência característica inferior à tração do concreto.

3.5. Evolução do módulo de elasticidade tangente inicial do concreto

De acordo com a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007), quando não existirem dados mais precisos sobre o concreto utilizado e quando não forem feitos ensaios pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade tangente inicial do concreto através da Eq. (3.7) a seguir.

$$E_c = \begin{cases} 5600 \times f_{ckj}^{0,5}, & 7 \leq j \leq 28 \text{ dias} \\ 5600 \times f_{ck}^{0,5}, & j > 28 \text{ dias} \end{cases} \quad (3.7)$$

3.6. Perdas imediatas no sistema de protensão com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior

3.6.1. Perdas por atrito

As perdas por atrito são de extrema importância para determinação dos esforços de protensão atuantes ao longo do elemento estrutural e acontecem nos macacos hidráulicos, nas ancoragens e ao longo do comprimento dos cabos de protensão.

3.6.1.1. Perdas por atrito nos macacos hidráulicos e nas ancoragens

Essas perdas são determinadas através de ensaios e variam de acordo com o modelo de macaco e ancoragens utilizados. Seus valores dependem do esforço efetivo aplicado nos cabos de protensão e é ligeiramente inferior ao produto da pressão manométrica indicada pela área do cilindro de protensão. Tais perdas equivalem, segundo Pfeil (1984b), a 5% da tensão inicial aplicada.

Geralmente essas perdas são compensadas aplicando-se aos cabos uma tensão normal (σ) equivalente a dada pela Eq. (3.8):

$$\sigma = 1,05 \times \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_{cil}} \quad (3.8)$$

Simbologia:

$P_{m\acute{a}x}$ – Força aplicada pelo macaco hidráulico no cabo;

A_{cil} – Área do cilindro do equipamento de protensão.

3.6.1.2. Perdas por atrito ao longo do cabo de protensão

Em geral, os cabos de protensão utilizados nas estruturas de concreto protendido têm em seu perfil longitudinal e em alguns casos, em seu perfil transversal, trajetórias curvas. Quando de seu estiramento durante a protensão, eles atiram contra a parede das bainhas metálicas em que estão inseridos provocando perdas na tensão inicial de protensão (PFEIL, 1980).

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007), diz que nos elementos estruturais com pós-tração, a perda por atrito pode ser determinada pela equação a seguir transcrita sob a forma de tensão:

$$\Delta\sigma_{\text{atrito}} = \sigma_{p\text{m}\acute{a}x} \times [1 - e^{-(\mu \times \alpha + k \times x)}] \quad (3.9)$$

Simbologia:

$\Delta\sigma_{\text{atrito}}$ – Perda de tensão de protensão devido ao atrito ao longo do cabo;

$\sigma_{p\text{m}\acute{a}x}$ – Tensão inicial de protensão;

α – Soma dos ângulos de desvio entre a ancoragem e o ponto de abscissa x , em radianos;

μ – Coeficiente de atrito aparente entre o cabo e a bainha, em 1/radianos;

k – Coeficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais do cabo.

Na falta de dados experimentais, a referida norma brasileira propõe valores estimados para μ e k como mostra a Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Coeficientes de atrito.

μ (1/rad)	k (1/m)	Condição
0,20	0,002	Atrito entre cordoalhas e bainha metálica
0,10	0,001	Atrito entre cordoalhas e bainha metálica lubrificada

Porém, segundo Pereira (1987), se considerarmos ao invés da formulação exponencial sugerida pela norma brasileira, uma formulação linear derivada da mesma e, também considerarmos a perda por atrito distribuída igualmente sobre o comprimento total do cabo, estaremos a favor da segurança e os trabalhos matemáticos serão significativamente menores.

Sendo assim, neste trabalho será considerado para efeito de obtenção das perdas por atrito ao longo do cabo a Eq. (3.10) descrita a seguir.

$$\sigma_{\text{atrito}} = \sigma_{p\text{m}\acute{a}x} \times [1 - (\mu \times \alpha + k \times x)] \quad (3.10)$$

Com isso, a obtenção dos alongamentos nas extremidades ativas dos cabos de protensão (que constitui um dos controles executivos e de projeto) fica facilitada, se convertendo na Eq. (3.11):

$$\Delta l = \frac{\sigma_{pm,m\acute{a}x} \times l}{E_p} \quad (3.11)$$

Simbologia:

$\sigma_{pm,m\acute{a}x}$ – Tensão média no cabo de protensão;

Δl – Alongamento do cabo de protensão;

l – Comprimento do cabo de protensão;

E_p – Módulo de elasticidade do aço de protensão.

Nos casos práticos temos três situações distintas a serem consideradas a cada caso: protensão por ambas as extremidades; somente pela extremidade da esquerda e somente pela extremidade da direita. Estudaremos, pois, a obtenção das perdas por atrito nas hipóteses supracitadas.

a) Cabos protendidos por ambas as extremidades

Nesta situação as perdas por atritos aumentam da extremidade para o ponto de escorregamento nulo do cabo onde, se tem a perda máxima de tensão por atrito. Pelo fato de considerarmos neste trabalho a formulação linear e distribuída da perda por atrito ao longo do cabo, o referido ponto sempre será a abscissa média do cabo de protensão analisado. Sendo assim, após a análise, as tensões atuantes no cabo após as perdas por atrito serão simétricas em relação a sua seção média e, serão dadas pelas Eqs. (3.12) a (3.14).

$$\sigma_{p0,min} = \sigma_{p0,m\acute{a}x} \times \left\{ 1 - \left(A_{cb} \times \left(\frac{VarAng + AngHor}{2} \right) + \frac{(P_{am} \times CH_c)}{2 \times 100} \right) \right\} \quad (3.12)$$

$$T_{vt} = \frac{2 \times (\sigma_{p0,m\acute{a}x} - \sigma_{p0,min})}{CH_c} \quad (3.13)$$

$$\sigma_{px,atrito} = \begin{cases} \sigma_{p0,min} + T_{vt} \times (x_m - x_a), & x_a \leq x_m \\ \sigma_{p0,min} + T_{vt} \times (x_a - x_m), & x_a > x_m \end{cases} \quad (3.14)$$

Simbologia:

$\sigma_{p0,min}$ – Tensão mínima no cabo após as perdas por atrito na seção de abscissa média;

$\sigma_{p0,m\acute{a}x}$ – Tensão produzida pelo equipamento de protensão;

A_{cb} – Coeficiente de atrito entre o cabo e a bainha;

AngHor – Variação angular horizontal do cabo;

P_{am} – Perda de atrito por metro (perda parasitária);

CH_c – Comprimento horizontal do cabo;

T_{vt} – Taxa de variação de tensão;

$\sigma_{px,atrito}$ – Tensão máxima no cabo após a perda por atrito na seção de abscissa x_a ;

x_a – Abscissa do ponto analisado;

x_m – Abscissa média do cabo.

b) Cabos protendidos pela extremidade esquerda

Nesta situação temos a menor perda de tensão por atrito na seção da esquerda onde ocorre o estiramento do cabo e conseqüentemente a maior perda ocorre na seção do final do cabo de protensão. Sendo assim, as tensões após as perdas por atrito serão dadas pelas Eqs. (3.15) a (3.17).

$$\sigma_{p0,min} = \sigma_{p0} \times \left\{ 1 - \left(A_{cb} \times (VarAng + AngHor) + \frac{(P_{am} \times CH_c)}{100} \right) \right\} \quad (3.15)$$

$$T_{vt} = \frac{(\sigma_{p0,máx} - \sigma_{p0,min})}{CH_c} \quad (3.16)$$

$$\sigma_{px,atrito} = \sigma_{p0,min} + T_{vt} \times (x_{fi} - x_a) \quad (3.17)$$

c) Cabos protendidos pela extremidade direita

Nesta situação temos a menor perda de tensão por atrito na seção da direita onde ocorre o estiramento do cabo e conseqüentemente a maior perda ocorre na seção do inicial do cabo de protensão. Sendo assim, as tensões após as perdas por atrito serão dadas pelas Eqs. (3.18) a (3.20).

$$\sigma_{p0,min} = \sigma_{p0} \times \left\{ 1 - \left(A_{cb} \times (VarAng + AngHor) + \frac{(P_{am} \times CH_c)}{100} \right) \right\} \quad (3.18)$$

$$T_{vt} = \frac{(\sigma_{p0,máx} - \sigma_{p0,min})}{CH_c} \quad (3.19)$$

$$\sigma_{px,atrito} = \sigma_{p0,min} + T_{vt} \times (x_a - x_{in}) \quad (3.20)$$

3.6.1.3. Perdas na cravação das ancoragens

No processo de protensão que utiliza macacos hidráulicos para promover o estiramento dos cabos e cunhas para fixação dos mesmos ao término da aplicação da força, sempre há, quando da cravação da cunha e descarregamento do macaco hidráulico, uma penetração da cunha na ancoragem e por conseqüência, uma perda no alongamento do cabo que se configura em uma perda de tensão do elemento protendido (BUCHAIM, 2007).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2007) esse deslocamento do cabo em conjunto com os dispositivos de ancoragem deve ser determinado experimentalmente ou adotado valores indicados pelos fabricantes dos mesmos.

Em alguns sistemas de protensão, principalmente nos casos onde se empregam cabos de pequeno comprimento e utilização de ancoragens ativas de ambos os lados do mesmo, pode-se fazer o uso de calços posicionados nas cabeças de ancoragem de modo a evitar e/ou minimizar o escorregamento do cabo no momento de sua cravação.

Para o cômputo dessa perda faz-se uso de um processo iterativo (Fig. 3.9) onde determinado o comprimento afetado pela penetração da cunha, é calculada a força ancorada e por conseqüência, tem-se a tensão ancorada e a perda de tensão (Fig. 3.8).

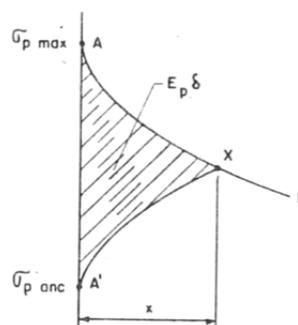


Figura 3.8 – Diagrama de tensões com perda por atrito e cravação das ancoragens.

Fonte: Pfeil (1983).

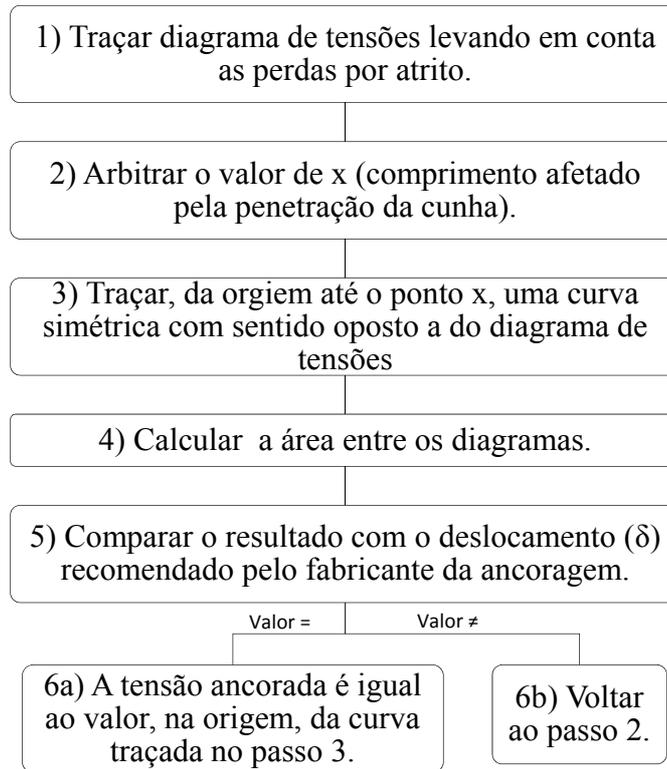


Figura 3.9 – Fluxograma para o cálculo da perda por atrito na cravação das ancoragens.

Pelo fato de se considerar a formulação linear e distribuída das perdas por atrito ao longo do cabo, a área entre os diagramas de tensão considerando o atrito ao longo do cabo e de tensão considerando o atrito ao longo do cabo e o atrito na cravação das ancoragens se simplifica a um triângulo isósceles. Com isso, temos:

$$C_{Anc} = \left(\frac{E_p \times \delta}{T_{vt}} \right)^{0,5} \quad (3.21)$$

$$\Delta_{anc} = - \frac{(E_p \times \delta)}{CH_c} \quad (3.22)$$

$$Anc_{Esq} = x_{in} + C_{Anc} \quad (3.23)$$

$$Anc_{Dir} = x_{fi} - C_{Anc} \quad (3.24)$$

Simbologia:

$CAnc$ – Comprimento de ancoragem do cabo;

E_p – Módulo de elasticidade do aço de protensão;

δ – Escorregamento do dispositivo de ancoragem;

x_{fi} – Abscissa final do cabo;

Δ_{anc} – Perda de tensão por escorregamento da ancoragem por metro;

x_{in} – Abscissa inicial do cabo;

$AncEsq$ – Abscissa do ponto onde o escorregamento da ancoragem da esquerda não provoca mais perdas de tensão;

$AncDir$ – Abscissa do ponto onde o escorregamento da ancoragem da direita não provoca mais perdas de tensão.

Neste caso existem também as três situações distintas: protensão por ambas as extremidades; somente pela extremidade da esquerda e somente pela extremidade da direita. Caso se considere a formulação linear das perdas por atrito ao longo do cabo a tensão atuante no cabo após essas perdas e de cravação das ancoragens será dada por:

a) Cabos protendidos por ambas as extremidades

$$\Delta\sigma_{px} = \begin{cases} -2 \times T_{vt} \times (AncEsq - x_a), & x_a \leq x_m \text{ e } CAnc \leq \frac{CH_c}{2} \\ & \text{e } (x_a - x_{in}) < CAnc \\ 0, & x_a \leq x_m \text{ e } CAnc \leq \frac{CH_c}{2} \\ & \text{e } (x_a - x_{in}) \geq CAnc \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\Delta\sigma_{px} = \begin{cases} -2 \times \left[T_{vt} \times \left(\frac{(x_m^2 - x_{in}^2)}{CH_c} - x_a \right) - \Delta_{anc} \right], & x_a \leq x_m \\ & \text{e } CAnc > \frac{CH_c}{2} \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\Delta\sigma_{px} = \begin{cases} -2 \times T_{vt} \times (x_a - AncDir), & \begin{matrix} x_a > x_m \\ e \ CAnc \leq \frac{CH_c}{2} \\ e \ (x_{fi} - x_a) < CAnc \end{matrix} \\ 0, & \begin{matrix} x_a > x_m \\ e \ CAnc \leq \frac{CH_c}{2} \\ e \ (x_a - x_{in}) \geq CAnc \end{matrix} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$\Delta\sigma_{px} = \begin{cases} -2 \times \left[T_{vt} \times \left(x_a - \frac{(x_{fi}^2 - x_m^2)}{CH_c} \right) - \Delta_{anc} \right], & \begin{matrix} x_a > x_m \\ e \ CAnc > \frac{CH_c}{2} \end{matrix} \end{cases} \quad (3.28)$$

Simbologia:

$\Delta\sigma_{px}$ – Perda por atrito no cabo na seção de abscissa x_a .

b) Cabos protendidos pela extremidade esquerda

$$\Delta\sigma_{px} = \begin{cases} -2 \times T_{vt} \times (AncEsq - x_a), & \begin{matrix} CAnc \leq CH_c \\ e \ (x_a - x_{in}) < CAnc \end{matrix} \\ 0, & \begin{matrix} CAnc \leq CH_c \\ e \ (x_a - x_{in}) \geq CAnc \end{matrix} \end{cases} \quad (3.29)$$

$$\Delta\sigma_{px} = \begin{cases} -2 \times T_{vt} \times (x_m - x_a) + \Delta_{anc}, & CAnc > CH_c \end{cases} \quad (3.30)$$

c) Cabos protendidos pela extremidade direita

$$\Delta\sigma_{px} = \begin{cases} -2 \times T_{vt} \times (AncDir - x_a), & \begin{matrix} CAnc \leq CH_c \\ e \ (x_{fi} - x_a) < CAnc \end{matrix} \\ 0, & \begin{matrix} CAnc \leq CH_c \\ e \ (x_{fi} - x_a) \geq CAnc \end{matrix} \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\Delta\sigma_{px} = \begin{cases} -2 \times T_{vt} \times (x_a - x_m) - \Delta_{anc}, & CAnc > CH_c \end{cases} \quad (3.32)$$

Calculadas as perdas por atrito ao longo do cabo e também as perdas devido ao escorregamento das ancoragens, as tensões restantes são dadas pela Eq. (3.33).

$$\sigma_{px,atrito+escorregamento} = \sigma_{px,m\acute{a}x} + \Delta\sigma_{px} \quad (3.33)$$

3.6.2. Perdas por deformação elástica

As perdas por deformação elástica do concreto ou encurtamento elástico acontecem à medida que o elemento estrutural tem, em seu processo de protensão, mais de uma fase de aplicação da força.

Assim, o primeiro cabo executado tem perda por encurtamento elástico dos (n-1) cabos restantes e, o último cabo tem essa perda nula.

A norma brasileira NBR-6118 (ABNT, 2007) propõe que nos elementos estruturais com pós-tração a perda média de tensão devido ao processo de protensão, por cabo, possa ser calculada pela Eq. (3.34):

$$\Delta\sigma_{px,encurtamento} = \frac{\alpha_p \times (\sigma_{cp} + \sigma_{cg}) \times (n_{cabos} - 1)}{2 \times n_{cabos}} \quad (3.34)$$

Simbologia:

$\Delta\sigma_{px,encurtamento}$ – Perda de tensão devido ao encurtamento elástico do concreto na seção de abscissa genérica x_a ;

α_p – Relação entre os módulos de elasticidade do concreto no instante da aplicação da força de protensão e do aço de protensão;

n_{cabos} – Número de cabos de protensão existentes na seção analisada;

σ_{cp} – Tensão inicial no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devida à protensão simultânea de n cabos;

σ_{cg} – Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devida à carga permanente mobilizada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão.

3.7. Tensão de protensão instalada

Chamaremos de tensão de protensão instalada, a tensão em cada cabo de protensão após processadas as perdas imediatas. Esta tensão pode ser calculada pela Eq. (3.35) a seguir:

$$\sigma_{px,instalada} = \sigma_{px,atrito+escorregamento} + \Delta\sigma_{px,encurtamento} \quad (3.35)$$

Simbologia:

$\sigma_{px,instalada}$ – Tensão atuante no cabo após as perdas iniciais na seção de abscissa genérica x_a .

3.8. Esforços iniciais de protensão

Como nas estruturas protendidas são introduzidas forças de compressão através das armaduras ativas e, no caso geral, como os cabos possuem trajetórias curvas e conseqüentemente seu baricentro não coincide com o da estrutura de concreto, essa introdução de forças gera esforços chamados de esforços iniciais de protensão ou esforços isostáticos de protensão.

Após a determinação das perdas iniciais de protensão e calculada a tensão de protensão instalada, é necessário então determinar os esforços iniciais de protensão atuantes na estrutura de tal forma que:

$$N_{x,ip} = \sum A_{cab} \times \sigma_{px,instalada} \times \cos(\alpha) \quad (3.36)$$

$$Q_{x,ip} = \sum A_{cab} \times \sigma_{px,instalada} \times \sen(\alpha) \quad (3.37)$$

$$M_{x,ip} = \sum A_{cab} \times \sigma_{px,instalada} \times \cos(\alpha) \times (Y_{cab} - Y_{cg}) \quad (3.38)$$

Simbologia:

$N_{x,ip}$ – Esforço axial inicial de protensão na seção de abscissa genérica x_a ;

A_{cab} – Área do cabo de protensão;

α – Ângulo do cabo de protensão na seção de abscissa genérica x_a ;

$Q_{x,ip}$ – Esforço cortante inicial de protensão na seção de abscissa genérica x_a ;

$M_{x,ip}$ – Momento fletor inicial de protensão na seção de abscissa genérica x_a ;

Y_{cab} – Ordenada do cabo na seção de abscissa genérica x_a ;

Y_{cg} – Distância do centro de gravidade da seção de abscissa genérica x_a da borda

superior.

3.9. Esforços hiperestáticos de protensão

Ao se protender uma estrutura estamos nada mais do que inserindo um carregamento auto-equilibrado que provoca esforços solicitantes nas seções, deformando-as. Nas estruturas isostáticas, como estas deformações podem ocorrer livremente, isto é, não são restringidas pelos apoios, a protensão não modifica nem as reações de apoio nem os diagramas de esforços solicitantes (GUYON, 1962).

Porém, quando temos estruturas hiperestáticas, por suas restrições de deslocamento, há mudanças tanto nas reações de apoio quando nos diagramas de esforços solicitantes. Chamam-se de esforços hiperestáticos de protensão as solicitações e reações geradas pela protensão em estruturas hiperestáticas. Com isso o momento total em uma seção qualquer será:

$$M_{Si} = M_{Se} + M_{hip} \quad (3.39)$$

Simbologia:

M_{Si} – Momento fletor solicitante total na seção genérica i ;

M_{Se} – Momento fletor gerado pela solicitação externa na seção genérica i ;

M_{hip} – Momento fletor hiperestático na seção genérica i .

Sendo assim, essa é uma etapa obrigatória quando se trata de estruturas hiperestáticas e devem ser efetuados seus cálculos tanto no término do cômputo dos esforços iniciais bem como no dos esforços finais de protensão.

3.9.1. Cálculo dos esforços hiperestáticos de protensão

Para o cálculo das solicitações hiperestáticas de protensão vamos utilizar o Método das Forças em sua forma matricial.

Esse método consiste em criar uma série de soluções básicas da estrutura (fases) que satisfazem suas condições de equilíbrio, mas não suas condições de compatibilidade para que na superposição das mesmas essa condição seja atendida (MARTHA, 2010). Logo, temos em ordem de acontecimento: em primeiro lugar o estabelecimento das condições de equilíbrio

depois, as condições sobre o comportamento dos materiais (leis constitutivas) e por fim as condições de compatibilidade.

São obtidas após a resolução da estrutura pelo Método das Forças, as reações de apoio hiperestáticas e com elas são calculados os momentos hiperestáticos de protensão em cada seção.

Para a obtenção das reações de apoio hiperestáticas basta resolver um sistema de equações, apresentado aqui de maneira matricial Eq. (3.40), onde no primeiro termo temos a matriz de flexibilidade da estrutura (matriz quadrada de ordem igual ao número de apoios da estrutura hiperestática menos dois); no segundo termo o vetor de reações hiperestáticas e no terceiro o vetor de deslocamentos e/ou rotações na direção e sentido das reações de apoio redundantes, provocadas pelo carregamento aplicado a estrutura isostática fundamental.

$$\begin{bmatrix} a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_i \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i \\ \dots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$a_{ij} = \int_0^l \frac{M_i \times M_j}{E_c \times I_c} dl + \int_0^l \frac{K \times V_i \times V_j}{E_c \times A_c} dl + \int_0^l \frac{T_i \times T_j}{G_c \times J_c} dl + \int_0^l \frac{N_i \times N_j}{G_c \times A_c} dl \quad (3.41)$$

Simbologia:

a_{ij} – Elementos da matriz de flexibilidade da estrutura (válido para $j \neq 0$ e $i \geq 0$);

X_i – Elementos do vetor de reações de apoio hiperestáticas da estrutura;

B_i – Elementos do vetor de deslocamentos e/ou rotações da estrutura (= a_{i0}).

l – Comprimento do elemento estudado;

M_0 – Momento fletor inicial ou final na seção devido à protensão (M_i para $i=0$);

M_i ou M_j – Momento fletor na seção, devido ao esforço unitário aplicado na direção do hiperestático i ou j (valido para $i > 0$ e $j \neq 0$);

K – Coeficiente de forma para cisalhamento;

V_0 – Esforço cortante inicial ou final na seção devido à protensão (V_i para $i=0$);

V_i ou V_j – Esforço cortante na seção, devido ao esforço unitário aplicado na

direção do hiperestático i ou j (valido para $i > 0$ e $j \neq 0$);

T_0 – Esforço de torção inicial ou final na seção devido à protensão (T_i para $i=0$);

T_i ou T_j – Esforço de torção na seção, devido ao esforço unitário aplicado na direção do hiperestático i ou j (valido para $i > 0$ e $j \neq 0$);

N_0 – Esforço axial inicial ou final na seção devido à protensão (N_i para $i=0$);

N_i ou N_j – Esforço axial na seção, devido ao esforço unitário aplicado na direção do hiperestático i ou j (valido para $i > 0$ e $j \neq 0$);

E_c – Módulo de elasticidade longitudinal do concreto;

I_c – Momento principal de inércia à flexão em torno do eixo de flexão da peça de concreto;

A_c – Área da seção transversal da peça de concreto;

G_c – Módulo de elasticidade transversal do concreto;

J_c – Momento principal de inércia à torção da peça de concreto.

Pode-se ver que cada termo a_{ij} da matriz de flexibilidade da estrutura Eq. (3.41) é composto de quatro partes sendo, por sua ordem de aparecimento, a componente que depende do momento fletor, do esforço cortante, do momento de torção e da força axial.

No presente trabalho, para o cálculo dos termos da matriz de flexibilidade usaremos a Eq. (3.42) pelos motivos abaixo:

- O termo relacionado ao momento de torção será nulo, pois, a análise aqui feita é contida no plano (bidimensional);
- O termo relacionado ao esforço axial também será nulo pois, nas estruturas em geral não temos mais de um apoio restringindo o deslocamento horizontal não sendo assim necessário o cálculo desta reação de apoio;
- O termo relacionado ao esforço cortante também será nulo visto que o mesmo tem pouca representatividade perante o termo relacionado ao momento fletor.

$$a_{ij} = \int_0^l \frac{M_i \times M_j}{E_c \times I_c} dl \quad (3.42)$$

3.9.2. Primeira regra de *Simpson*

Como somente possuímos os valores dos momentos fletores em cada seção utilizaremos uma integração numérica para determinação dos termos da matriz de flexibilidade.

O método de integração numérica adotado foi a primeira regra de *Simpson* Eq. (3.43) generalizada que, é uma interpolação polinomial de 2º grau, portanto tem valor exato para funções de até 3º grau e também possibilita a divisão desigual entre tramos.

Numerando a seção inicial da estrutura a partir do número zero e, sendo um número par de seções por vão temos:

$$a_{ij} = \frac{1}{3 \times E_c} \times \sum_0^{N_s} \Delta x \times C \times \frac{M_i \times M_j}{I_c} \quad (3.43)$$

Simbologia:

Δx – Distância entre duas seções consecutivas quaisquer de cada tramo;

N_s – Número total de seções;

C – Coeficiente de *Simpson* (1 para seções extremas, 2 para seções de número par e 4 para seções de número ímpar).

Após a resolução do sistema matricial de equações e conseqüentemente a obtenção das reações de apoio hiperestáticas iniciais ou finais (dependendo da fase de análise) são obtidos os esforços hiperestáticos de protensão representados pelo momento fletor, esforço cortante e esforço axial hiperestático.

3.10. Deformações diferidas do concreto

Nesta sub-seção serão estudadas as propriedades reológicas de fluência e retração do concreto que, são de suma importância para a aferição das tensões em serviço atuantes nas estruturas protendidas. Para se chegar às suas formulações finais, serão introduzidos conceitos normativos de algumas variáveis que influenciam seus resultados. Tais formulações são

válidas para concretos estruturais que atendem aos requisitos da norma brasileira NBR 8953 (ABNT, 2011).

3.10.1. Idade fictícia do concreto

Chama-se de idade fictícia do concreto, uma correlação matemática que visa ajustar as propriedades reológicas do concreto para os casos em que seu endurecimento ocorre em temperaturas diferentes de 20°C e, tem influência nos efeitos das deformações causadas por retração e fluência do concreto. Tal formulação não se aplica, porém a concretos submetidos a cura a vapor. De acordo com Pereira (1987), devido ao fato de ocorrer variação de temperatura durante a execução da obra é recomendado um cálculo levando em conta 20°C de variação sempre à favor da segurança.

Define-se então que a idade corrigida do concreto, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007) é:

$$t = \alpha_c \sum \frac{T_{amb} + 10}{30} \Delta t_{ef,i} \quad (3.44)$$

Simbologia:

t – Idade fictícia do concreto, em dias;

α_c – Coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento (Tab. 3.2);

T_{amb} – Temperatura média diária do ambiente, em graus Celsius;

$\Delta t_{ef,i}$ – Período, em dias, durante o qual a temperatura média diária do ambiente T_i pode ser admitida constante.

Tabela 3.2 - Valores sugeridos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2007) para o coeficiente α_c .

Cimento Portland (CP)	α_c	
	Fluência	Retração
De endurecimento lento (CP III e CP IV, todas as classes de resistência)	1	1
De endurecimento normal (CP I e CP II, todas as classes de resistência)	2	
De endurecimento rápido (CP V-ARI)	3	
Onde:		
CP I e CP I-S - Cimento Portland comum;		
CP II-E, CP II-F e CP II-Z - Cimento Portland composto;		
CP III - Cimento Portland de alto forno;		
CP IV - Cimento Portland pozolânico;		
CP V-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial;		
RS - Cimento Portland resistente a sulfatos (propriedade específica de alguns tipo de cimento citados).		

3.10.2. Espessura fictícia da peça

Chama-se de espessura fictícia da peça, a espessura de uma parede, com as duas faces em contato com a atmosfera, que sofre o mesmo efeito das deformações por retração e fluência do concreto que a peça estudada, multiplicada por um coeficiente que reflete a influência da umidade relativa do ar sobre os citados efeitos (PFEIL,1983).

Sua formulação matemática é proposta pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007) como sendo:

$$h_{fic} = \gamma_U \frac{2 \times A_c}{u_{ar}} \quad (3.45)$$

$$\gamma_U = 1 + e^{(-7,8+0,1 \times U)} \quad (3.46)$$

Simbologia:

h_{fic} – Espessura fictícia da peça de concreto;

γ_U – Coeficiente dependente da umidade relativa do ar;

U – Umidade relativa do ar, em porcentagem;

u_{ar} – Perímetro externo da peça em contato com o ar.

3.10.3. Deformação por fluência no concreto

3.10.3.1. Hipóteses básicas

Para o cálculo das deformações por fluência no concreto, quando das tensões em serviço, admitem-se as seguintes hipóteses conforme consta da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007):

- a) A deformação por fluência do concreto ε_{cc} varia linearmente com a tensão aplicada;
- b) Para acréscimos de tensão aplicados em instantes distintos, os respectivos efeitos de fluência se superpõem;
- c) A deformação rápida produz deformações constantes ao longo do tempo; os valores de coeficiente φ_a são função da relação entre a resistência do concreto no momento da aplicação da carga e sua resistência final;
- d) O coeficiente de deformação lenta reversível φ_d depende apenas da duração do carregamento; o seu valor final e o seu desenvolvimento ao longo do tempo são independentes da idade do concreto no momento da aplicação da carga;
- e) O coeficiente da deformação lenta irreversível φ_f depende da umidade relativa do ambiente, consistência do concreto no lançamento, espessura fictícia da peça, idade fictícia do concreto no instante t_0 da aplicação da carga e da idade fictícia do concreto no instante considerado t .
- f) Para o mesmo concreto, as curvas de deformação lenta irreversível, em função do tempo, correspondentes às diferentes idade do concreto no momento do carregamento, são obtidas, umas em relação às outras, por deslocamento paralelo ao eixo das deformações.

3.10.3.2. Valor da deformação por fluência do concreto

Segundo a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007), a deformação devido à fluência do concreto é dada por:

$$\varepsilon_{cc(t,t_0)} = \frac{\sigma_c}{E_{c28}} \varphi(t,t_0) \quad (3.47)$$

$$E_{c28} = 5600 \times \sqrt{fck} \quad (3.48)$$

$$\varphi_{(t,t_0)} = \varphi_a + \varphi_{f\infty} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty} \beta_d \quad (3.49)$$

$$\varphi_a = 0,8 \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right] \quad (3.50)$$

$$\varphi_{f\infty} = \varphi_{1c} \times \varphi_{2c} \quad (3.51)$$

$$\varphi_{1c} = 4,45 - 0,035 \times U \quad (3.52)$$

$$\varphi_{2c} = \frac{42 + h_{fic}}{20 + h_{fic}} \quad (3.53)$$

$$\beta_d(t) = \frac{t - t_0 + 20}{t - t_0 + 70} \quad (3.54)$$

$$\beta_f(t) = \frac{t^2 + A \times t + B}{t^2 + C \times t + D} \quad (3.55)$$

$$A = 42 \times h_{fic}^3 - 350 \times h_{fic}^2 + 588 \times h_{fic} + 113 \quad (3.56)$$

$$B = 768 \times h_{fic}^3 - 3060 \times h_{fic}^2 + 3234 \times h_{fic} - 23 \quad (3.57)$$

$$C = -200 \times h_{fic}^3 + 13 \times h_{fic}^2 + 1090 \times h_{fic} + 183 \quad (3.58)$$

$$D = 7579 \times h_{fic}^3 - 31916 \times h_{fic}^2 + 35343 \times h_{fic} + 1931 \quad (3.59)$$

Simbologia:

$\varepsilon_{cc(t,t_0)}$ – Deformação devido a fluência do concreto;

σ_c – Tensão atuante na peça;

E_{c28} – Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto aos 28 dias;

$\varphi_{(t,t_0)}$ – Coeficiente de Fluência;

φ_a – Coeficiente de deformação rápida irreversível;

$\varphi_{f\infty}$ – Coeficiente de deformação lenta irreversível em função da espessura fictícia da peça e umidade relativa do ar;

$\beta_f(t)$ ou $\beta_{f(t_0)}$ – Coeficiente de deformação lenta irreversível em função da espessura

fictícia da peça e idade do concreto (Fig. 3.10);

t – Idade fictícia do concreto no instante considerado, em dias;

t_0 – Idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento, em dias;

$\varphi_{d\infty}$ – Coeficiente de deformação lenta reversível, considerado igual a 0,4;

β_d – Coeficiente de deformação lenta reversível em função do tempo ($t-t_0$) decorrido após o carregamento;

$f_{c(t_0)}/f_{c(t_\infty)}$ – Função do crescimento da resistência do concreto com a idade;

φ_{1c} – Parcela do coeficiente de deformação lenta irreversível que depende da umidade relativa do ar e da consistência do concreto. Equação válida para abatimentos entre 5 cm e 9 cm. Para valores de abatimento entre 0 cm e 4 cm, com $U \leq 90\%$, considerar 25% menor do que o calculado pela equação. Para valores de abatimento entre 10 cm e 15 cm, com $U \leq 90\%$, considerar 25% maior do que o calculado pela equação;

φ_{2c} – Parcela do coeficiente de deformação lenta irreversível que depende da espessura fictícia da peça;

A, B, C e D – Coeficientes da função β_f .

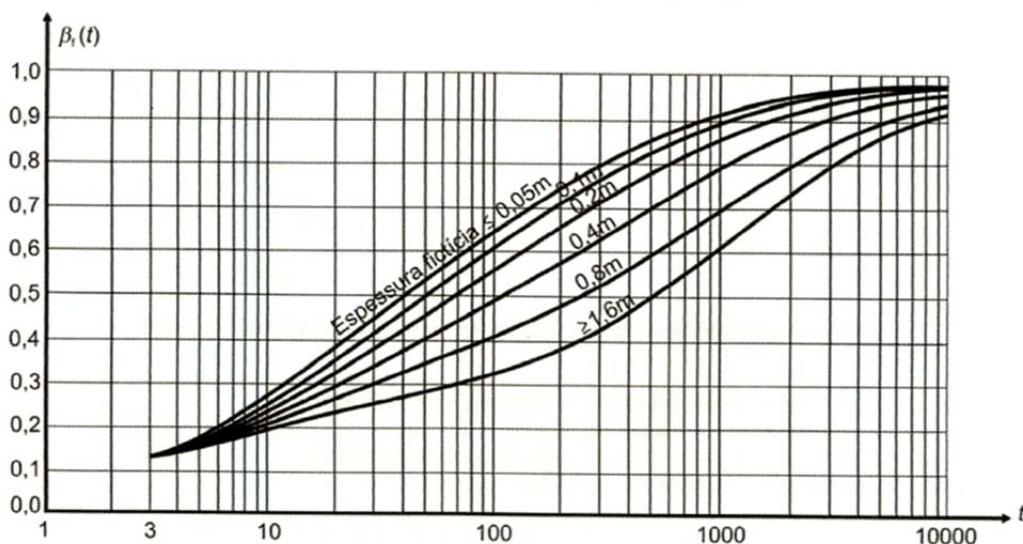


Figura 3.10 – Diagrama do coeficiente β_f .

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2007).

3.10.4. Deformação por retração no concreto

3.10.4.1. Hipóteses básicas

Para o cálculo das deformações por retração no concreto, admitem-se a seguinte hipótese presente da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007):

- a) A deformação por retração do concreto depende somente da umidade relativa do ambiente, da consistência do concreto no instante de seu lançamento, da espessura fictícia da peça e da idade fictícia do concreto.

3.10.4.2. Valor da deformação por retração do concreto

Segundo a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007), a deformação devido à retração do concreto entre os instantes t e t_0 é dada pelas Eqs. (3.60) a (3.69) a seguir:

$$\varepsilon_{cs(t,t_0)} = \varepsilon_{cs\infty} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (3.60)$$

$$\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{1s} \times \varepsilon_{2s} \quad (3.61)$$

$$10^4 \varepsilon_{1s} = -6,16 - \frac{U}{484} + \frac{U^2}{1590} \quad (3.62)$$

$$\varepsilon_{2s} = \frac{33 + 2 \times h_{fic}}{20,8 + 3 \times h_{fic}} \quad (3.63)$$

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A_r \times \left(\frac{t}{100}\right)^2 + B_r \times \left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C_r \times \left(\frac{t}{100}\right)^2 + D_r \times \left(\frac{t}{100}\right) + E_r} \quad (3.64)$$

$$A_r = 40 \quad (3.65)$$

$$B_r = 116 \times h_{fic}^3 - 282 \times h_{fic}^2 + 220 \times h_{fic} - 4,8 \quad (3.66)$$

$$C_r = 2,5 \times h_{fic}^3 - 8,8 \times h_{fic} + 40,7 \quad (3.67)$$

$$D_r = -75 \times h_{fic}^3 + 585 \times h_{fic}^2 + 496 \times h_{fic} - 6,8 \quad (3.68)$$

$$E_r = -169 \times h_{fic}^4 + 88 \times h_{fic}^3 + 584 \times h_{fic}^2 - 39 \times h_{fic} + 0,8 \quad (3.69)$$

Simbologia:

$\varepsilon_{cs(t,t_0)}$ – Deformação devido a retração do concreto;

$\varepsilon_{cs\infty}$ – Valor final da retração;

ε_{1s} – Coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto. Equação válida para abatimentos entre 5 cm e 9 cm. Para valores de abatimento entre 0 cm e 4 cm, com $U \leq 90\%$, considerar 25% menor do que o calculado pela equação. Para valores de abatimento entre 10 cm e 15 cm, com $U \leq 90\%$, considerar 25% maior do que o calculado pela equação;

ε_{2s} – Coeficiente dependente da espessura fictícia da peça;

$\beta_s(t)$ ou $\beta_s(t_0)$ – Coeficiente relativo à retração em função da espessura fictícia da peça e idade do concreto (Fig. 3.11);

A_r , B_r , C_r , D_r e E_r – Coeficientes da função β_s .

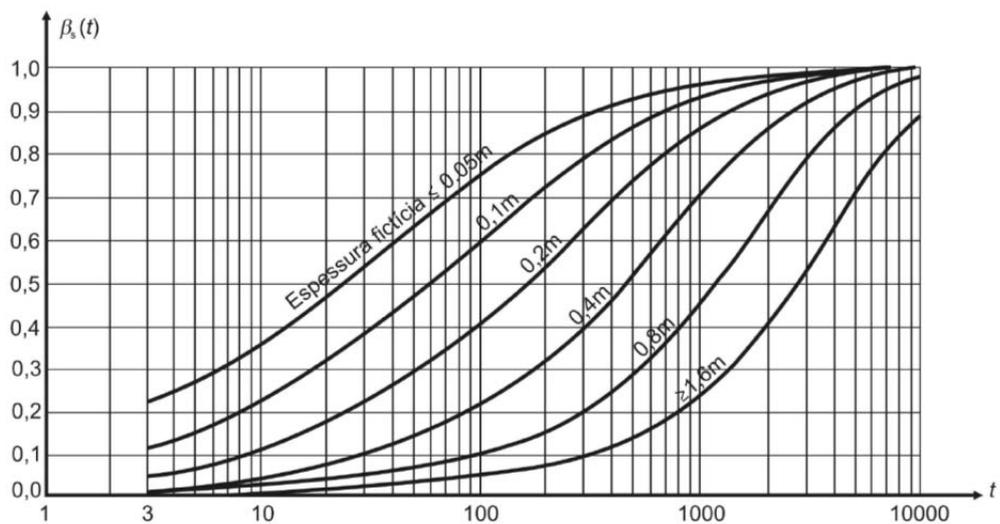


Figura 3.11 - Diagrama do coeficiente β_s .

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2007).

3.11. Relaxação do aço de protensão

O fenômeno denominado relaxação pura do aço de protensão é a perda de tensão da armadura ativa quando a mesma está submetida a elevadas tensões e, ancorada com comprimento constante (PFEIL, 1980).

De acordo com Cholfe e Bonilha (2013), os fatores mais importantes que influenciam no valor da relaxação do aço são suas características metalúrgicas, a tensão ao qual ele está submetido e a temperatura ambiente.

As perdas por relaxação pura da armadura ativa geralmente são aferidas em um espaço de tempo igual a 1000 horas sob temperatura constante de 20°C. Essas medidas são realizadas com o aço submetido a diferentes níveis de tensão e são chamadas de perdas de tensão por relaxação pura após 1000 horas (ψ_{1000}).

De acordo com a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007) a intensidade da relaxação pura do aço, admitida estabilizada após aproximadamente 51 anos, pode ser tomada aproximadamente igual a duas vezes e meia aos valores experimentais medidos sob as condições já descritas Eq. (3.70).

$$\psi_{(t,t_0)} = \begin{cases} \psi_{1000} \times \left(\frac{t - t_0}{41,67}\right)^{0,15} \leq 2,5 \times \psi_{1000} \end{cases} \quad (3.70)$$

Simbologia:

ψ_{1000} – Valor médio de relaxação medido após 1000h à temperatura de 20°C;

$\psi_{(t,t_0)}$ – Intensidade da relaxação pura do aço no intervalo de tempo entre t e t_0 .

Para efeito de projeto, os valores de ψ_{1000} recomendados pela NBR 6118 (ABNT, 2007) são os dados pela Tab. 3.3:

Tabela 3.3 – Valores de ψ_{1000} em porcentagem.

σ_p	Cordoalhas	
	RN	RB
0,5 f_{ptk}	0	0
0,6 f_{ptk}	3,5	1,3
0,7 f_{ptk}	7,0	2,5
0,8 f_{ptk}	12,0	3,5
Onde:		
RN - Relaxação Normal;		
RB - Relaxação Baixa;		

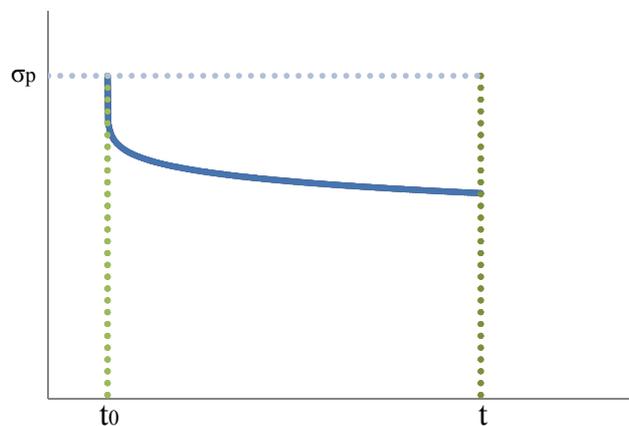


Figura 3.12 – Perda por relaxação pura do aço sob tensão constante.

3.11.1. Efeito da temperatura sobre a relaxação do aço de armadura ativa

É sabido que a temperatura afeta não só as propriedades mecânicas dos materiais bem como suas propriedades físicas sendo assim necessário o conhecimento do comportamento dos materiais envolvidos em função dessa variável.

No modelo matemático adotado a temperatura é um fator levado em conta nas formulações de fluência e retração do concreto porém seu efeito não é levado em conta no fenômeno da relaxação.

De acordo com Rostásy *et al* (1991) para aços de RB a perda de tensão na armadura ativa devido a relaxação isotérmica do aço, desde que ele esteja submetido a temperatura constante menor do que 130°C, pode ser calculada pelas Eqs. 3.71 a 3.73 a seguir:

$$R(t_h, T) = a(t_h) \times e^{b(t_h) \times T} \quad (3.71)$$

$$a(t_h) = 0,320 \times (1 + 0,23 \times \ln t_h) \quad (3.72)$$

$$b(t_h) = 0,014 \times (1 + 0,03 \times \ln t_h) \quad (3.73)$$

Simbologia:

$R_{(t_h, T)}$ – Perda de tensão por relaxação expressa em porcentagem;

$a_{(t_h)}$ e $b_{(t_h)}$ – Coeficientes em função do tempo t_h ;

t_h – Tempo de ocorrência da relaxação em horas;

T – Temperatura em graus Celsius.

Apartir da formulação anterior foi considerado um coeficiente de influência da temperatura sobre o efeito da relaxação da armadura ativa, somente para os aços do tipo RB. Este coeficiente representa a razão entre a relaxação considerando a temperatura ao qual a estrutura está submetida e a temperatura de 20°C Eq. (3.74) demonstrado graficamente em função da temperatura na Fig. 3.13 a seguir:

$$R_T = \frac{R(t_h, T)}{R(t_h, 20)} \quad (3.74)$$

Simbologia:

R_T – Coeficiente de influência da temperatura;

$R_{(t_h, 20)}$ – Relaxação calculada considerando a temperatura igual a 20°C.

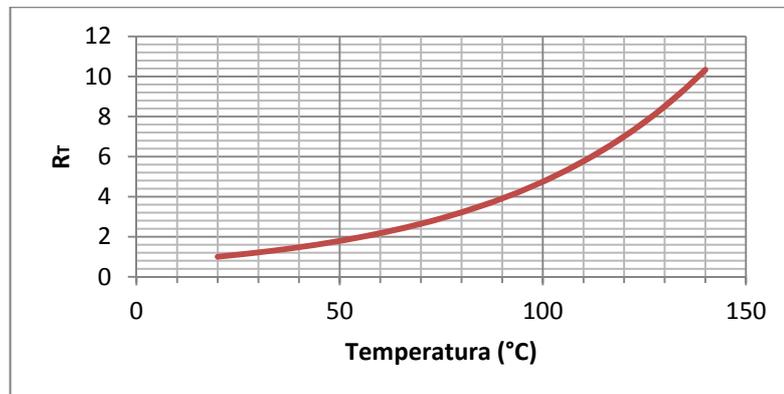


Figura 3.13 - Diagrama do coeficiente R_T em função da temperatura para 51 anos.

3.12. Perdas diferidas no sistema de protensão com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior

Como já dito anteriormente, as perdas diferidas de protensão se resumem em perdas causadas por deformação do concreto pelo efeito de fluência e retração e pela relaxação do aço.

De acordo com Singh et al. (2013), quando se usa formulações que consideram o módulo de elasticidade longitudinal do concreto constante ou quando se considera o mesmo variando ao longo do tempo, tem-se uma diferença considerável em termos da perda de protensão calculada, tanto diferida quanto a perda por encurtamento elástico (imediate).

Com base neste fato e, para proporcionar um resultado mais preciso em termos de perdas de tensão para intervalos pequenos de análise (menores ou iguais a 28 dias), foi utilizada uma formulação simplificada que considera a evolução do módulo de elasticidade longitudinal do concreto ao longo do tempo preconizada pelo Código Modelo 1978 (CEB-FIP, 1978) e conhecida como fórmula derivada do método da tensão média com E_c variável.

Nas expressões matemáticas expostas a seguir, às hipóteses iniciais do modelo matemático devem ser as adicionadas as seguintes considerações:

- As ações variáveis/acidentais não produzem deformações importantes por fluência devido ao seus curtos períodos de atuação;
- Os cabos de protensão são tratados como um único cabo resultante posicionado no centro de gravidade do conjunto.

3.12.1. Perdas diferidas devido a retração e fluência do concreto

Seguindo as premissas anteriormente descritas e, utilizando a fórmula derivada do método da tensão média com E_c variável, as perdas diferidas provocadas pelos efeitos de retração e fluência do concreto são descritas pela Eq. 3.75 a seguir.

$$\Delta\sigma_{p,cs} = \frac{\varepsilon_{cs(t,t_0)} \times E_p + n \times \varphi_{(t,t_0)} \times (\sigma_{cg} + \sigma_{cp0})}{1 - \frac{\sigma_{cp0}}{2 \times \sigma_{p0}} \times \frac{E_p \times (E_{c(t)} + E_{c(t_0)})}{E_{c(t)} \times E_{c(t_0)}} + n \times \varphi_{(t,t_0)}} \quad (3.75)$$

Simbologia:

$\varepsilon_{cs(t,t_0)}$ – Deformação devido a retração do concreto;

$\varphi_{(t,t_0)}$ – Coeficiente de Fluência;

$\Delta\sigma_{p,cs}$ – Perda de tensão no aço de armadura ativa devido à retração e fluência do concreto;

n – Relação entre os módulos de elasticidade longitudinal do aço de protensão e do concreto;

σ_{cp0} – Tensão inicial no concreto, ao nível do cabo, devido apenas à protensão;

E_p – Módulo de elasticidade do aço de protensão;

σ_{p0} – Tensão inicial no cabo, devido apenas à protensão;

σ_{cg} – Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devida à carga permanente mobilizada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão;

$E_{c(t)}$ ou $E_{c(t_0)}$ – Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto nos instantes t e t_0 , respectivamente.

3.12.2. Perdas diferidas devido a relaxação do aço de armadura ativa

Como nas peças de concreto protendido o comprimento entre os pontos de ancoragem são modificados devido às deformações diferidas devido a retração e fluência do concreto, a perda por relaxação da armadura ativa é menor do que a perda por relaxação pura do aço sendo chamada de perda por relaxação relativa (CHOLFE e BONILHA, 2013).

Essas perdas, ao contrário das provocadas por relaxação pura que são medidas em laboratório, são estimadas por processos aproximados sendo adotado neste trabalho a expressão proposta pelo Código Modelo 1978 (CEB-FIP, 1978) descrita pelas Eqs. (3.76) e (3.77).

$$\Delta\sigma_{pr(t,t_0)} = -\psi_{(t,t_0)} \times \sigma_{pr} \times R_T \quad (3.76)$$

$$\sigma_{pr} = \sigma_{p0} + n \times \sigma_{cg} + 0,3 \times \Delta\sigma_{p,csr} \quad (3.77)$$

Simbologia:

σ_{cg} – Tensão no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devida à carga permanente mobilizada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão;

$\Delta\sigma_{pr(t,t_0)}$ – perda de tensão por relaxação relativa do aço no intervalo t_0 a t ;

$\psi_{(t,t_0)}$ – Coeficiente de intensidade da relaxação do aço no intervalo t_0 a t ;

σ_{pr} – tensão atuante no cabo para o cômputo da relaxação do aço de protensão;

n – relação entre os módulos de elasticidade longitudinal do aço de protensão e do concreto;

$\Delta\sigma_{p,csr}$ – perda de tensão no aço de armadura ativa devido à retração e fluência do concreto e relaxação do aço de protensão.

3.12.3. Perdas diferidas totais

Assim, para determinação das perdas de retração e fluência do concreto e relaxação do aço de armadura ativa de forma conjunta utilizaremos novamente a fórmula derivada do método da tensão média com E_c variável preconizado pelo Código Modelo 1978 (CEB-FIP, 1978) desenvolvida por Pereira (1987) sobre a forma de variação de tensão:

$$\Delta\sigma_{p,csr} = \frac{\varepsilon_{cs(t,t_0)} \times E_p + n \times \varphi_{(t,t_0)} \times (\sigma_{cg} + \sigma_{cp0}) + \Delta\sigma_{pr(t,t_0)}}{1 - \frac{\sigma_{cp0}}{2 \times \sigma_{p0}} \times \frac{E_p \times (E_c(t) + E_c(t_0))}{E_c(t) \times E_c(t_0)} + n \times \varphi_{(t,t_0)}} \quad (3.78)$$

Como as deformações de fluência e relaxação são interdependentes, pois a armadura de protensão não fica submetida nem a tensão constante nem a deformação constante e também devido ao fato de que ambos os fenômenos são também influenciados pela retração do concreto, as perdas totais de protensão não podem ser explicitadas em termos de variáveis conhecidas recaindo em um problema iterativo (Fig. 3.14).

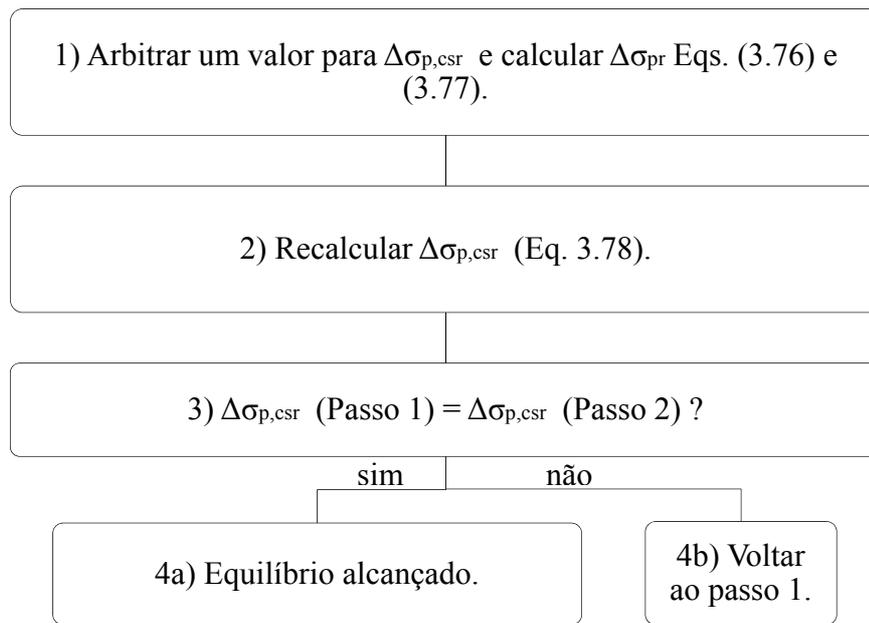


Figura 3.14 - Fluxograma de determinação das perdas diferidas de protensão.

3.13. Tensão final de protensão

Chamaremos neste trabalho de tensão final de protensão em uma seção genérica a tensão atuante na armadura ativa após o processamento das perdas imediatas e diferidas, sendo assim ela se traduz, de maneira geral:

$$\sigma_{px,final} = \sigma_{px,instalada} - \Delta\sigma_{p,csr} \quad (3.79)$$

Simbologia:

$\sigma_{px,final}$ – Tensão no cabo após as perdas imediatas e diferidas na seção de abscissa genérica x_a .

3.14. Esforços finais de protensão

De maneira similar à obtenção dos esforços iniciais de protensão, após a determinação das perdas diferidas de protensão é necessário determinar os esforços finais de tal forma que:

$$N_{x,fp} = \sum A_{cab} \times \sigma_{px,final} \times \cos(\alpha) \quad (3.80)$$

$$Q_{x,fp} = \sum A_{cab} \times \sigma_{px,final} \times \sen(\alpha) \quad (3.81)$$

$$M_{x,fp} = \sum A_{cab} \times \sigma_{px,final} \times \cos(\alpha) \times (Y_{cab} - Y_{cg}) \quad (3.82)$$

Simbologia:

$Q_{x,fp}$ – Esforço cortante final de protensão na seção de abscissa genérica x_a ;

$M_{x,fp}$ – Momento fletor inicial de protensão na seção de abscissa genérica x_a ;

$N_{x,fp}$ – Esforço axial final de protensão na seção de abscissa genérica x_a .

3.15. Tensões finais atuantes no concreto, no sistema de protensão com cabos pós-tracionados compostos de cordoalhas com aderência posterior

Após a determinação dos esforços iniciais e finais de protensão, passamos ao cálculo das tensões normais máximas e mínimas no concreto, em cada seção para as diversas combinações de ações com o uso das equações da resistência dos materiais (HIBBELER, 2010) mostradas abaixo:

$$\sigma_{sup} = \frac{N x_a}{A_c} + \frac{M_{x_a}}{I_c} \times Y_s \quad (3.83)$$

$$\sigma_{inf} = \frac{N x_a}{A_c} - \frac{M_{x_a}}{I_c} \times Y_i \quad (3.84)$$

Simbologia:

σ_{sup} – Tensão atuante na borda superior da seção transversal de concreto;

N_{x_a} – Esforço axial atuante na seção genérica de abscissa x_a ;

M_{x_a} – Momento fletor atuante na seção genérica de abscissa x_a ;

Y_s – Distância do centro de gravidade da seção transversal à borda superior ;

Y_i – Distância do centro de gravidade da seção transversal à borda inferior.

3.16. Deslocamentos da estrutura sob ação de cargas permanentes

Com posse dos momentos fletores atuantes devido ao carregamento externo e a protensão, nas idades iniciais e finais de análise, os deslocamentos da estrutura sob ação das cargas permanentes são determinados usando o método da carga unitária (MCU) também conhecido

como método de Maxwell-Mohr que é uma particularização do princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV) na qual se considera a força virtual com o valor unitário.

Apartir desta consideração e admitindo, como no cálculo das reações hiperestáticas de protensão que as parcelas relativas ao esforço cortante, axial e momento de torção podem ser desprezadas, o deslocamento inicial, de acordo com (HIBBELER, 2010), será:

$$\delta_x = \int_0^l \frac{m_x M_e}{(0,85 \times E_c) \times I_c} dx \quad (3.85)$$

Simbologia:

δ_x – Deslocamento vertical do ponto de abscissa x;

m_x – Momento fletor causado pelo esforço virtual unitário aplicado no ponto de abscissa x;

M_e – Momento fletor devido aos carregamentos externos;

E_c – Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto;

I_c – Momento principal de inércia à flexão em torno do eixo de flexão da peça de concreto.

Devido ao fato de não termos as equações de momentos fletores ao longo da estrutura mas sim os valores dos esforços nas seções pré-determinadas da peça, será feita uma integração numérica utilizando a primeira regra de *Simpson*, sendo o deslocamento calculado pela Eq. 3.86.

$$\delta_x = \frac{1}{3 \times (0,85 \times E_c)} \times \sum_{i=0}^{N_s} \Delta x \times C \times \frac{m_{xi} \times M_{ei}}{I_c} \quad (3.86)$$

Simbologia:

δ_x – Deslocamento vertical do ponto de abscissa x;

N_s – Número total de seções;

M_{ei} – Momento fletor devido aos carregamentos externos na seção i;

m_{xi} – Momento fletor devido ao carregamento virtual unitário na seção i;

Δx – Distância entre duas seções consecutivas quaisquer de cada tramo;

C – Coeficiente de *Simpson* (1 para seções extremas, 2 para seções de número par e 4 para seções de número ímpar);

E_c – Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto;

I_c – Momento principal de inércia à flexão em torno do eixo de flexão da peça de concreto.

Para o cálculo dos deslocamentos finais da estrutura sob ação das cargas permanentes, também será utilizada a Eq. 3.86 porém, para se considerar a fluência do concreto basta dividir o momento principal de inércia à flexão em torno do eixo de flexão da peça de concreto (I_c) pelo fator $(1 + \varphi_{(t,t_0)})$.

4

ESPECIFICAÇÕES DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo é apresentada a implementação computacional gerada com bases nos estudos e, contendo o modelo matemático exposto. São delimitados os seus usos e suas funções principais bem como os dados que são pré-requisitos de seu funcionamento.

4.1. Tipo de estrutura considerada

A implementação computacional foi desenvolvida na linguagem de programação orientada a objetos *Microsoft Visual Basic .NET* e, se propõe a computar as tensões tanto na armadura passiva quanto no concreto no estado de serviço para estruturas constituídas por uma única viga reta com qualquer número e relação de vãos. Considera-se a protensão aplicada por meio de pós-tração com uso de cordoalhas aderentes, realizadas em uma única etapa que, pode ser constituída de várias fases, cada uma produzindo um encurtamento elástico do concreto sobre a outra.

Supõe-se também que a estrutura dividida em seções possua todas as características geométricas previamente conhecidas que, inclusive poderão variar ao longo do eixo longitudinal da estrutura.

A implementação aqui descrita foi prevista inicialmente para trabalhar com estruturas sujeitas a carregamento dinâmico, sendo assim tem seus cálculos efetuados e verificação de tensões em serviço de maneira automática para estruturas do tipo:

- Passarela de pedestre;
- Ponte rodoviária;
- Ponte ferroviária especializada;
- Ponte ferroviária não especializada;
- Vigas de pontes rolantes.

Porém, é aplicável a qualquer tipo de estrutura, pois permite a criação de regras adicionais para verificação de tensões.

4.2. Dados de entrada

Para o funcionamento do sistema formulado há de se conhecer previamente alguns dados chamados aqui de dados de entrada. Tais dados podem ser inseridos através da interface gráfica bem como pelo preenchimento do arquivo texto tabulado usado pela implementação e, estão divididos em 9 grupos a serem explicitados a seguir.

4.2.1. Dados gerais da estrutura

Para este módulo, será necessário informar:

- a) Número de apoios;
- b) Número de seções;
- c) Número de propriedades geométricas;
- d) Número de grupos de cabos;
- e) Número de combinações adicionais;
- f) Tipo de estrutura.

Da resposta ao item a) sabe-se se a análise a ser efetuada fará o cômputo dos esforços hiperestáticos de protensão ou não. Do item b), define-se a quantidade de variáveis a serem fornecidas em termos de carregamento pelo usuário. Do item c), a variabilidade da seção transversal da estrutura é avaliada. Do item d) o número de cabos da viga é definido. Do item

e), o número de regras adicionais as quais a análise de tensões é submetida e por fim os limites de tensões a serem adotados.

4.2.2. Dados dos apoios

Este módulo tem por finalidade caracterizar a posição das restrições verticais da estrutura sendo, portanto fornecida nesta etapa as abscissas e os nomes dos apoios.

4.2.3. Dados do concreto

Este módulo visa caracterizar o material constituído de concreto, para tanto deverão ser conhecidos os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de Poisson;
- Abatimento no *Slump Test* (cm);
- Data do início da cura (dias);
- Resistência característica à compressão aos 28 dias (f_{ck}) do concreto utilizado (MPa);
- Tipo de cimento utilizado na fabricação do concreto (CP-I, CP-II, CP-III, CP-IV ou CP-V-ARI);
- Tempo de análise (dias). Este valor deverá ser igual a “infinito” para análise em tempo normativo infinito ou ser um valor numérico maior do que a data do início da cura;
- Nome do material para efeito de armazenamento de dados.

4.2.4. Dados do aço de protensão e das condições do meio ambiente

Este módulo visa caracterizar o material constituído de aço para armadura ativa bem como as condições ambientais médias; para tanto deverão ser conhecidos os seguintes parâmetros:

- Módulo de elasticidade longitudinal do aço;
- Resistência característica à tração (f_{ptk}) do aço utilizado (MPa);
- Tipo de aço utilizado (RN ou RB);
- Coeficiente de atrito entre o cabo e a bainha;

- Perda de atrito por metro (%);
- Escorregamento do dispositivo de ancoragem (m);
- Umidade média relativa do ar (%);
- Temperatura média do ambiente (°C);
- Data da protensão (dias);
- Nome do material para efeito de armazenamento de dados.

4.2.5. Dados relativos aos grupos de cabos de protensão

A partir dos dados de entrada, neste módulo há de se informar para cada grupo de cabos:

- Área de aço de armadura ativa (cm²);
- Número de cabos de protensão (no caso de se haver cabos simétricos em relação a seção transversal da peça);
- Tensão inicial de protensão (MPa);
- Desvio angular horizontal (°);
- Número de pontos notáveis de controle do cabo;
- Modo de protensão (por ambas as extremidades, pela extremidade esquerda ou pela extremidade direita);
- Nome do grupo de cabo de protensão para armazenamento;
- Coordenadas de todos os pontos notáveis dos cabos de protensão com indicação de pontos de inflexão quando houver.

4.2.6. Dados relativos às propriedades geométricas das seções transversais

As propriedades geométricas são definidas neste módulo e aplicadas às seções transversais através de seu número identificador, o que reduz, na maioria dos casos, o volume de entrada de dados visto que uma propriedade geométrica pode ser aplicada a várias seções transversais. Para caracterização de tais propriedades torna-se necessário o conhecimento das seguintes informações:

- Área da seção transversal (m^2);
- Momento de inércia em torno do eixo de flexão principal (m^4);
- Altura da seção transversal (m);
- Altura do centro de gravidade da seção transversal à borda superior (m);
- Perímetro da seção transversal em contato com o ambiente (m);
- Nome da característica geométrica para posterior uso e controle.

4.2.7. Dados relativos às seções transversais

Definidas as propriedades geométricas, neste módulo são atribuídas tais características às diversas seções transversais existentes na estrutura bem como a indicação de localização das mesmas segundo o eixo longitudinal da viga. Logo, nesta etapa são necessários:

- Abscissa da seção transversal (m);
- Número do identificador da propriedade geométrica a ser atribuída;
- Nome da seção transversal para controle.

4.2.8. Dados relativos aos carregamentos

Como a implementação aqui exposta não determina os esforços atuantes nas estruturas devido aos carregamentos (exceto os relacionados ao processo da protensão), é necessário o conhecimento prévio das envoltórias de solicitações a que a peça está submetida.

Sendo assim, os carregamentos considerados que deverão ser informados são as envoltórias de momento fletor e de esforço cortante.

4.2.8.1. Envoltória de momentos fletores

Devido a inicial consideração de que geralmente seriam trabalhadas aqui estruturas sujeitas a cargas móveis, principalmente as pontes rodoviárias, os esforços solicitados por seção transversal são:

- M_{g1} – Momento fletor devido ao peso próprio da estrutura (KNm);

- M_{g2} – Momento fletor devido ao peso próprio, porém, adicionado depois da execução da obra como, por exemplo, guarda-rodas de pontes rodoviárias (KNm);
- $M_{máx}$ – Momento fletor máximo devido as cargas móveis (KNm);
- $M_{mín}$ – Momento fletor mínimo devido as cargas móveis (KNm).

4.2.8.2. Envoltória de esforços cortantes

De forma similar ao item anterior, os esforços solicitados por seção transversal são:

- V_{g1} – Esforço cortante devido ao peso próprio da estrutura (KN);
- V_{g2} – Esforço cortante devido ao peso próprio, porém adicionado depois da execução da obra como, por exemplo, guarda-rodas de pontes rodoviárias (KN);
- $V_{máx}$ – Esforço cortante máximo devido as cargas móveis (KN);
- $V_{mín}$ – Esforço cortante mínimo devido as cargas móveis (KN).

4.2.9. Dados relativos às combinações adicionais

Como a princípio as combinações padrões podem não atender de maneira suficiente às situações e combinações de carga para o tipo específico de estrutura analisada, este módulo visa armazenar as combinações adicionais requeridas pelo projetista de modo a verificar também estas combinações de carga.

Para que seja possível a montagem das equações de combinação de carga, devemos seguir a seguinte convenção dada pela Eq. (4.1) a seguir:

$$CE = \gamma_1 \times N_{ip} + \gamma_2 \times N_{fp} + \gamma_3 \times M_{g1} + \gamma_4 \times M_{g2} + \gamma_5 \times M_{máx} + \gamma_6 \times M_{mín} + \gamma_7 \times M_{ip} + \gamma_8 \times M_{fp} + \gamma_9 \times M_{hip} + \gamma_{10} \times M_{hfp} \quad (4.1)$$

Simbologia:

CE – Combinação de cargas especial ou adicional;

γ_1 – Coeficiente de ponderação para carga N_{ip} (esforço normal inicial de protensão);

γ_2 – Coeficiente de ponderação para carga N_{fp} (esforço normal final de protensão);

γ_3 – Coeficiente de ponderação para carga permanente M_{g1} ;

γ_4 – Coeficiente de ponderação para carga permanente M_{g2} ;

γ_5 – Coeficiente de ponderação para carga móvel $M_{m\acute{a}x}$;

γ_6 – Coeficiente de ponderação para carga móvel $M_{m\acute{i}n}$;

γ_7 – Coeficiente de ponderação para carga M_{ip} (momento fletor inicial de protensão);

γ_8 – Coeficiente de ponderação para carga M_{fp} (momento fletor final de protensão);

γ_9 – Coeficiente de ponderação para carga M_{hip} (momento fletor hiperestático inicial de protensão);

γ_{10} – Coeficiente de ponderação para carga M_{hfp} (momento fletor hiperestático final de protensão).

Também é necessária a informação sobre os limites de tensão a tração e compressão no concreto para que seja feita a análise.

4.3. Consistência dos dados

Visando garantir um correto funcionamento do sistema, são feitas consistência de dados em dois níveis denominados de local e global.

O processo de validação dos dados começa na consistência local. Em cada módulo, ao término da inserção de dados pelo usuário, são verificadas as possíveis incoerências encontradas nas variáveis informadas, gerando alertas de erro em tempo de execução para que o usuário tenha conhecimento e corrija em tempo hábil.

Na análise da consistência global, o sistema faz uma última verificação dos dados considerando todas as variáveis inseridas e se necessário emitindo alertas de erro quando alguma informação estiver fora dos parâmetros aceitáveis.

4.4. Processamento

Após a passagem com sucesso pela etapa de consistência de dados, o passo a seguir será o processamento do conjunto de informações inseridas na entrada de dados. O processamento se baseia na aplicação das metodologias numéricas vistas anteriormente e considerando que o

número de fases de protensão é igual ao número de grupos de cabos de armadura ativa sendo o cabo com maior índice o último a ser protendido (não sofre influência do encurtamento elástico do concreto).

4.4.1. Combinação de ações padrão

Visando analisar as tensões em serviço para as situações principais a que a estrutura está submetida, a cada combinação de ações previstas para NBR 6118 (ABNT, 2007) foram atribuídos 6 casos de carga a serem descritos pelas Eqs. (4.2) a (4.7) e pela Tab. 4.1:

$$CP_1 = E_{ip} + E_{hip} + M_{g1} \quad (4.2)$$

$$CP_2 = E_{fp} + E_{hfp} + M_{g1} \quad (4.3)$$

$$CP_3 = E_{fp} + E_{hfp} + M_{g1} + M_{g2} \quad (4.4)$$

$$CP_4 = E_{fp} + E_{hfp} + M_{g1} + M_{g2} + \psi_j \times M_{m\acute{a}x} \quad (4.5)$$

$$CP_5 = E_{fp} + E_{hfp} + M_{g1} + M_{g2} + \psi_j \times M_{m\acute{i}n} \quad (4.6)$$

$$CP_6 = 1,1 \times E_{ip} + 1,1 \times E_{hip} + M_{g1} \quad (4.7)$$

Simbologia:

CP – Combinação padrão;

E_{ip} – Esforços iniciais de protensão;

E_{hip} – Esforços hiperestáticos iniciais de protensão;

E_{fp} – Esforços finais de protensão;

E_{hfp} – Esforços hiperestáticos finais de protensão;

ψ_j – Coeficiente de ponderação da carga acidental.

Tabela 4.1 – Descrição dos casos de carga.

Casos de carga	Fase em que a estrutura se encontra
CP ₁	Logo após a protensão.
CP ₂	Depois de processadas as perdas imediatas e diferidas porém antes da aplicação da carga acidental e da 2ª parcela da carga permanente.
CP ₃	Depois de processadas as perdas imediatas e diferidas porém antes da aplicação da carga acidental.
CP ₄	Depois de processadas as perdas imediatas e diferidas e com aplicação do carregamento adicional correspondente à envoltória máxima.
CP ₅	Depois de processadas as perdas imediatas e diferidas e com aplicação do carregamento adicional correspondente à envoltória mínima.
CP ₆	Logo após a protensão (verificação do estado limite último no ato da protensão).

Para a análise dos deslocamentos da estrutura sob ação de cargas permanentes foram consideradas apenas as combinações CP₁ e CP₃ correspondendo respectivamente à configuração inicial e final da estrutura sob ação da protensão.

Paralelamente, foram retirados os esforços devido a protensão destas duas combinações para avaliação dos deslocamentos da estrutura na hipótese de que a mesma não fosse protendida.

4.4.2. Limites de tensões admissíveis

De modo a verificar se as tensões atuantes no concreto são aceitáveis do ponto de vista normativo ou não, adotou-se como limite de tensões para as combinações previstas pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007) os seguintes valores:

Tabela 4.2 – Limites de tensões.

Casos de carga	Estado limite analisado	Limite de tensão de compressão	Limite de tensão de tração
CP ₁ a CP ₅	ELS-F	$-0,6 \times f_{ckj}$ (ELS – CE)*	$f_{ctkj,inf} \div 0,7$
	ELS-D	$-0,6 \times f_{ckj}$ (ELS – CE)*	0
CP ₆	ELU-AP	$-0,7 \times f_{ckj}$	$0,36 \times f_{ckj}^{2/3}$

* Valores sugeridos por Cholfé e Bonilha (2013)

Simbologia:

ELU-AP – Estado limite último no ato da protensão.

4.5. Resultados obtidos

Os resultados esperados a serem obtidos através da análise dos dados da estrutura são assim divididos:

4.5.1. Posição dos grupos de cabos e tensões atuantes na armadura ativa nas seções de projeto

Nesta seção os resultados produzidos são:

- Ângulo vertical na extremidade do cabo;
- Variação angular vertical;
- Comprimento em projeção horizontal do cabo;
- Comprimento real do cabo;
- Comprimento de ancoragem;
- Alongamento teórico do cabo;
- Posição do cabo em cada seção de projeto;
- Ângulo do cabo em cada seção de projeto;
- Perda de tensão por atrito entre o cabo e a bainha por seção;
- Tensão inicial já descontada a perda por atrito por seção;
- Perda de tensão pelo escorregamento da ancoragem por seção
- Perda por encurtamento elástico do concreto por seção;
- Tensão instalada em cada seção;
- Perda de tensão por retração e fluência por seção;
- Perda de tensão por relaxação por seção;
- Tensão final no cabo após as perdas iniciais e diferidas por seção.

4.5.2. Esforços de protensão

Nesta seção os resultados produzidos são:

- Esforço axial devido a fase inicial (gerado após o processamento das perdas imediatas) e final de protensão (após as perdas imediatas e diferidas);
- Esforço cortante devido à fase inicial (gerado após o processamento das perdas imediatas) e final de protensão (após as perdas imediatas e diferidas);
- Momento fletor hiperestático devido à fase inicial (gerado após o processamento das perdas imediatas) e final de protensão (após as perdas imediatas e diferidas);
- Esforço cortante hiperestático devido à fase inicial de protensão (gerado após o processamento das perdas imediatas) e final de protensão (após as perdas imediatas e diferidas);
- Reações de apoio hiperestáticas relativas à fase final e inicial.

4.5.3. Tensões atuantes nas seções no concreto

São apresentadas aqui as tensões normais no concreto devido às diferentes combinações de ações e aos diferentes casos de carga. Para efeito de projeto, somente serão apresentadas as tensões normais nas bordas superior e inferior de cada seção.

4.5.4. Deslocamentos sob ação dos carregamentos permanentes

Apresentam-se aqui os deslocamentos da estrutura sob ação das cargas permanentes no instante inicial (após as perdas imediatas de protensão) e final (após as perdas diferidas de protensão) ao longo de toda a estrutura bem como as flechas iniciais e finais da peça desconsiderando os efeitos da protensão.

4.6. Pós-processamento (apresentação dos resultados)

Por fim, realizado o processamento dos dados relativos à estrutura analisada, o conjunto de informações é organizado para ser apresentado dentro da aplicação e/ou sob forma de relatório a ser impresso contendo neste caso todas as informações relativas ao modelo estudado.

4.6.1. Visualização através da implementação computacional

A visualização dos resultados obtidos pela análise da estrutura através do programa computacional é fracionada isto é, não é possível a apresentação de todos os subprodutos obtidos de uma só vez.

Sendo assim, a apresentação dos resultados é feita nas partes, a saber:

- Posição dos grupos de cabos e tensões atuantes na armadura ativa nas seções de projeto;
- Esforços iniciais e finais de protensão;
- Tensões no concreto devido às combinações de projeto;
- Visualização gráfica dos resultados descritos anteriormente.

4.6.2. Visualização por meio de relatório

Este tipo de visualização engloba todas as informações relativas à estrutura desde os dados de entrada até os resultados e suas análises. Sua apresentação se dá por meio de um relatório que pode ser impresso. Nos apêndices A, B e F serão apresentados respectivamente, relatórios de duas obras e de um exemplo teórico utilizados como parâmetros de comparação dos resultados obtidos. Os apêndices C, D e E apresentam relatórios de ensaios.

5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como medida de comprovação da efetividade do modelo matemático e visando também avaliar as tendências normativas quanto aos valores das perdas diferidas de protensão, neste capítulo são feitas análises sobre algumas etapas de cálculo com base em fatores estatísticos específicos.

5.1. Medidas de posição

Medidas de posição ou medidas de tendência central são informações sintetizadas sobre as variáveis estudadas que nos permitem avaliar o comportamento das mesmas. No presente trabalho iremos trabalhar com a medida de posição chamada de média aritmética.

5.1.1. Média aritmética simples de uma amostra

Diz-se que um número é a média aritmética de dois outros números quando a diferença entre os números e a média é igual em módulo. Sendo assim e generalizando para um tamanho qualquer de amostra tem-se a expressão para a média aritmética simples dada pela Eq. (5.1) a seguir:

$$\bar{x} = \frac{1}{n_a} \sum_{w=1}^{n_a} x_w \quad (5.1)$$

Simbologia:

\bar{x} – Média aritmética simples;

n_a – Número de dados da amostra;

x_w – Dado genérico da amostra.

5.2. Medidas de dispersão

Por muitas vezes, as medidas de tendência central podem não ser suficientes para descrever o conjunto de dados de forma satisfatória. Essas situações ocorrem quando se trabalha com uma amostra cujas variáveis tem alta variabilidade.

De acordo com Magalhães e Lima (2007) a variabilidade de uma amostra não é captada pela média aritmética dos valores da variável analisada. Sendo assim, trabalharemos em conjunto com as medidas de dispersão chamadas de desvio padrão e coeficiente de variação de modo a quantificar tal característica.

5.2.1. Desvio padrão de uma amostra

O desvio padrão de uma amostra é um dos parâmetros mais comuns usados na estatística de amostras e representa o quanto os valores das medidas estão distantes da própria média. Logo, quanto menor seu valor, mais representativo se torna o conjunto de dados analisados.

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{n_a - 1} \sum_{w=1}^{n_a} (x_w - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

Simbologia:

σ_a – Desvio padrão.

5.2.2. Coeficiente de variação

Por definição o coeficiente de variação é o desvio padrão expresso como porcentagem da média aritmética e é um medidor de dispersão da amostra de dados sendo por consequência um indicador sobre a variabilidade da amostra.

$$COV = \sigma_a / \bar{x} \quad (5.3)$$

Simbologia:

COV – Coeficiente de variação.

5.3. Descrição dos resultados apresentados

Visando avaliar as principais etapas de cálculo após a ocorrência das perdas imediatas são demonstrados a seguir os resultados relativos às perdas de tensões por retração e fluência, por relaxação do aço de protensão, tensões finais de protensão e as tensões atuantes na borda superior e inferior da seção transversal de concreto nas principais seções de projeto (seções dos apoios, dos extremos dos balanços longitudinais e seções no meio dos vãos) comparados aos resultados obtidos utilizando-se a formulação de Pereira (1987).

A formulação ao qual o resultado da implementação computacional é comparado foi escolhida como parâmetro de aferição do modelo proposto, pois é utilizada frequentemente pelos profissionais da área de estruturas.

Tal formulação segue em vários pontos tratamentos matemáticos diferentes em relação aos efeitos dependentes do tempo para o concreto estrutural (atribuídos às mudanças normativas) sendo assim, é esperado que seus valores em relação às perdas de tensão da armadura ativa devido a retração e fluência do concreto e relaxação do aço sejam diferentes dos encontrados efetuando-se os cálculos pelo modelo proposto, diferença essa que servirá de parâmetro para análise das tendências normativas.

Além da comparação supracitada, serão confrontados valores obtidos pelo modelo matemático proposto com os valores experimentais de perdas de protensão obtidos por Lundqvist e Riihimäki (2010) e valores diversos obtidos por Almeida et al. (2003).

Também foram avaliadas as razões entre os deslocamentos das estruturas sob ação das cargas permanentes no instante inicial e final evidenciando assim o efeito da fluência do concreto em relação às flechas da estrutura.

5.4. Resultados apartir da formulação de Pereira (1987)

Tratam-se de duas estruturas de concreto protendido sendo uma delas já executada e outra em execução e que foram calculadas à sua época de projeto com o auxílio de uma ferramenta computacional contendo a formulação matemática de Pereira (1987).

5.4.1. Estrutura A: 4 apoios

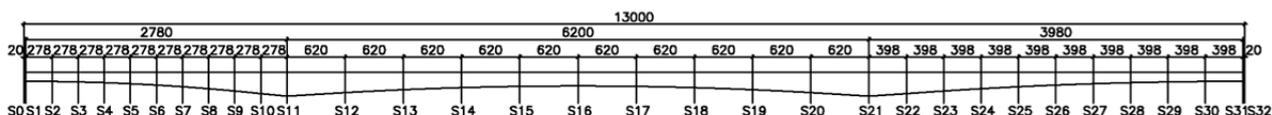
Trata-se de uma passarela de pedestres de concreto protendido com seção variável localizada na Rua Varginha, na cidade de Belo Horizonte/MG e que possui seu projeto datado de 1987 (Fig. 5.1).



Figura 5.1 – Vista lateral da passarela da rua Varginha, Belo Horizonte/MG.

Fonte: Google Maps (acessado em 06/01/2014).

Tal estrutura tem um comprimento total de 130,0m e foi discretizada em 33 seções das quais se possui todas as características geométricas da peça bem como o posicionamento dos cabos de protensão (12 grupos de cabos, totalizando 24 cabos de protensão). Os apoios de tal estrutura estão posicionados nas seções S1, S11, S21 e S31 mostradas na Fig. 5.2.



Dimensões em centímetros.

Figura 5.2 – Esquema da discretização longitudinal da passarela.

Após o processamento dos dados, alguns dos resultados obtidos foram comparados aos contidos na memória de cálculo da estrutura sendo considerado o tempo infinito como tempo final de análise.

5.4.1.1. Perdas de tensões na armadura ativa devido à retração e fluência do concreto

Tabela 5.1 – Comparação das perdas de tensão por retração e fluência na estrutura A.

Seção	ξ	Seção	ξ
0	0,85	17	0,80
1	0,86	18	0,82
2	0,86	19	0,84
3	0,85	20	0,84
4	0,85	21	0,82
5	0,85	22	0,83
6	0,84	23	0,85
7	0,84	24	0,84
8	0,84	25	0,84
9	0,84	26	0,85
10	0,82	27	0,85
11	0,82	28	0,84
12	0,85	29	0,85
13	0,85	30	0,85
14	0,82	31	0,85
15	0,80	32	0,85
16	0,78		
Média			0,84
Desvio Padrão			0,02
Coefficiente de Variação (%)			2,14

Simbologia:

ξ – Razão entre os resultados obtidos pela formulação exposta e os comparados.

5.4.1.2. Perdas de tensões na armadura ativa devido à relaxação do aço

Tabela 5.2 – Comparação das perdas de tensão por relaxação do aço na estrutura A.

Seção	ξ	Seção	ξ
0	1,14	17	0,97
1	1,15	18	1,00
2	1,17	19	1,11
3	1,18	20	1,23
4	1,21	21	1,23
5	1,24	22	1,26
6	1,25	23	1,22
7	1,25	24	1,16
8	1,24	25	1,12
9	1,25	26	1,10
10	1,25	27	1,12
11	1,23	28	1,19
12	1,22	29	1,18
13	1,11	30	1,16
14	1,00	31	1,16
15	0,99	32	1,15
16	0,95		
Média			1,16
Desvio Padrão			0,09
Coefficiente de Variação (%)			7,65

5.4.1.3. Tensão final na armadura ativa

Tabela 5.3 – Comparação das tensões finais nas armaduras ativas na estrutura A.

Razão matemática (ξ)												
Grupo de Cabos												
Seção	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12
0	1,00	1,00	1,00									
1	1,00	1,00	1,00									
2	1,00	1,00	1,00									
3	1,00	1,00	1,00									
4	1,00	1,00	1,00									
5	1,00	1,01	1,01									
6	1,01	1,01	1,01									
7	1,01	1,01	1,01	1,01								
8	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02							
9	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01							
10	1,00	1,00		1,00	1,00							
11	0,99	0,99		0,99	0,99							
12	1,01	1,01		1,01	1,01	1,01						
13	1,00			1,00	1,00	1,00	1,00					
14				0,98	0,98	0,98	0,98	0,98				
15				0,97	0,97	0,97	0,97	0,97				
16				0,96	0,96	0,97	0,97	0,97				
17				0,97	0,97	0,97	0,98	0,97				
18				0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00			
19				1,00	1,00	1,00	1,00		1,01	1,00		
20				1,01	1,01	1,01			1,01	1,01	1,01	
21				0,99	0,99				0,99	1,00	1,00	
22				1,01	1,01				1,01	1,01	1,01	
23				1,01	1,02				1,02	1,02	1,02	1,02
24				1,01	1,01				1,02	1,02	1,02	1,03
25				1,01					1,01	1,01	1,01	1,02
26									1,00	1,00	1,00	1,02
27									1,00	0,99	0,99	1,02
28										0,98	0,98	1,01
29										0,98	0,98	1,01
30										0,99	0,99	1,01
31										1,00	1,00	1,01
32										1,00	1,00	1,01
Média												1,00
Desvio Padrão												0,01
Coefficiente de Variação (%)												1,42

5.4.1.4. Esforços de protensão

Tabela 5.4 – Comparação dos esforços de protensão na estrutura A.

Seção	Razão matemática (ξ)				
	Nfp	Vfp	Mfp	Vhfp	Mhfp
Extremo do balanço a esquerda	1,00	1,00	0,87	1,00	1,00
Apoio 1 a esquerda	1,00	1,00	0,87	1,00	1,00
Apoio 1 a direita				0,92	
Meio do vão entre apoios 1 e 2	1,01	1,11	1,01	0,92	0,92
Apoio 2 a esquerda	0,99	1,00	0,98	0,99	0,92
Apoio 2 a direita				0,99	
Meio do vão entre apoios 2 e 3	0,97	1,00	0,97	1,02	0,94
Apoio 3 a esquerda	0,99	1,00	0,98	0,99	0,96
Apoio 3 a direita				0,99	
Meio do vão entre apoios 3 e 4	1,01	1,01	1,01	0,96	0,96
Apoio 4 a esquerda	1,00	0,99	0,98	0,99	1,00
Apoio 4 a direita				0,99	
Extremo do balanço a direita	1,00	0,99	1,15	1,00	1,00
Média					0,99
Desvio Padrão					0,05
Coefficiente de Variação (%)					4,65

5.4.1.5. Tensões atuantes no concreto

Tabela 5.5 – Comparação das tensões atuantes no concreto na estrutura A.

Seção	Borda	Razão matemática (ξ)						
		Hipóteses de Carga *						
		CE-1	CE-2	CE-3	CE-4	CE-5	CE-6	CE-7
Extremo do balanço a esquerda	BS	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	BI	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Apoio 1	BS	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
	BI	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Meio do vão entre apoios 1 e 2	BS	0,95	0,98	0,98	0,98	0,42	0,98	0,95
	BI	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01	1,02	1,02
Apoio 2	BS	0,95	0,96	0,94	0,95	0,81	0,95	0,91
	BI	1,07	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
Meio do vão entre apoios 2 e 3	BS	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	BI	0,89	0,92	0,90	0,74	0,92	0,86	0,91
Apoio 3	BS	0,96	0,97	0,96	0,96	0,92	0,96	0,95
	BI	1,07	1,02	1,02	1,02	1,01	1,02	1,01
Meio do vão entre apoios 3 e 4	BS	0,94	0,96	0,96	0,98	0,92	0,97	0,95
	BI	1,00	1,02	1,02	1,03	1,02	1,03	1,02
Apoio 4	BS	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	BI	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
Extremo do balanço a direita	BS	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	BI	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
Média								0,98
Desvio Padrão								0,07
Coefficiente de Variação (%)								6,84

Simbologia:

BS – Borda superior da seção transversal de concreto;

BI – Borda inferior da seção transversal de concreto;

*- Hipóteses de carga presentes nos apêndices A e B.

5.4.1.6. Exigências quanto a fissuração

Através do processamento do modelo computacional a estrutura em questão foi analisada no que diz respeito as exigências quanto a fissuração preconizadas pela NBR 6118 (ABNT, 2007) sendo os resultados obtidos representados pela Tab. 5.6.

Tabela 5.6 – Verificação quanto a fissuração.

Tipo de Concreto Estrutural	Exigências Relativas à Fissuração	Combinação de Ações em Serviço a Utilizar	Status da Verificação
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Combinação Frequente (CF)	Verificação não Necessária
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)	ELS-F	Combinação Frequente (CF)	Atendida
	ELS-D	Combinação Quase Permanente (CQP)	Atendida
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)	ELS-F	Combinação Rara (CR)	Atendida
	ELS-D	Combinação Frequente (CF)	Atendida

Os resultados vão de encontro à condição de estado da estrutura que, não apresenta sinais visíveis de danos estruturais sob cargas de serviço.

5.4.1.7. Deslocamentos da estrutura

Após a determinação dos esforços iniciais e finais introduzidos pela protensão são apresentados os deslocamentos da estruturas relativos ao instante inicial e final com e sem consideração do efeito da protensão (Tab. 5.7).

Tabela 5.7 – Deslocamentos da estrutura A.

Seção	δ_1 - Deslocamentos iniciais sem protensão (cm)	δ_2 - Deslocamentos iniciais com protensão (cm)	δ_3 - Deslocamentos finais sem protensão (cm)	δ_4 - Deslocamentos finais com protensão (cm)
Externo do balanço a esquerda	-0,05	0,00	-0,18	-0,04
Meio do vão entre apoios 1 e 2	2,98	0,10	10,48	2,69
Meio do vão entre apoios 2 e 3	-14,95	1,77	-52,84	-7,41
Meio do vão entre apoios 3 e 4	0,11	1,79	0,13	4,64
Externo do balanço a direita	0,06	-0,03	0,21	-0,03

Deslocamentos negativos indicam que o ponto analisado se encontra abaixo do eixo da estrutura indeformada

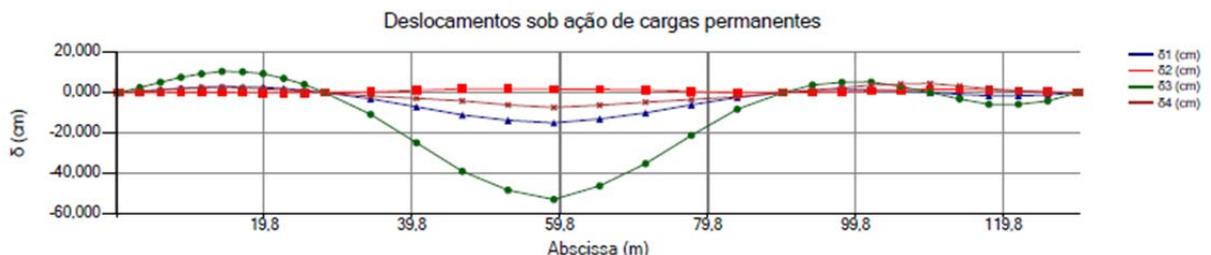


Figura 5.3 – Deslocamentos da estrutura A.

Dos resultados apresentados na Tab. 5.7 e na Fig. 5.3 observa-se que o comportamento da estrutura em relação aos deslocamentos sob ação das cargas permanentes melhorou com a consideração da protensão passando de uma flecha máxima de aproximadamente $L/117$ (-52,84 cm) para $L/837$ (-7,41 cm).

5.4.2. Estrutura B: 2 apoios

Trata-se de um viaduto protendido a ser construído na rodovia MGC-462 próximo ao município de Perdizes/MG para transpor uma via ferroviária da Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) e que possui seu projeto datado de 2010.

O viaduto é esconso ao eixo da rodovia e seu tabuleiro é em seção caixão perdido constituído de duas longarinas principais interligadas pela laje superior e inferior e por três transversinas de vão (Fig. 5.4). O comprimento total da estrutura, medido pelo eixo do estaqueamento da rodovia, é de 37,0 m e sua largura total, medida perpendicularmente ao eixo da rodovia, é de 10,4m.

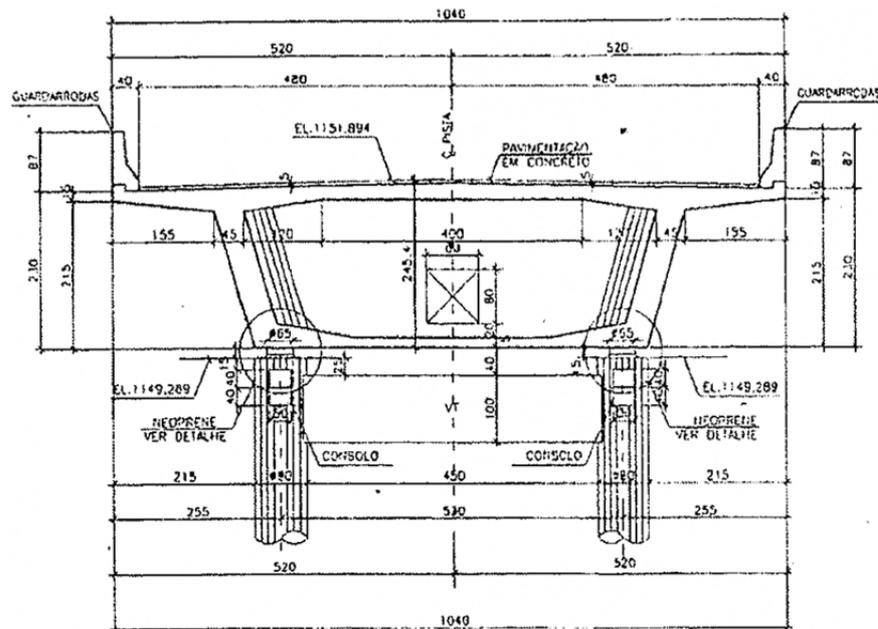
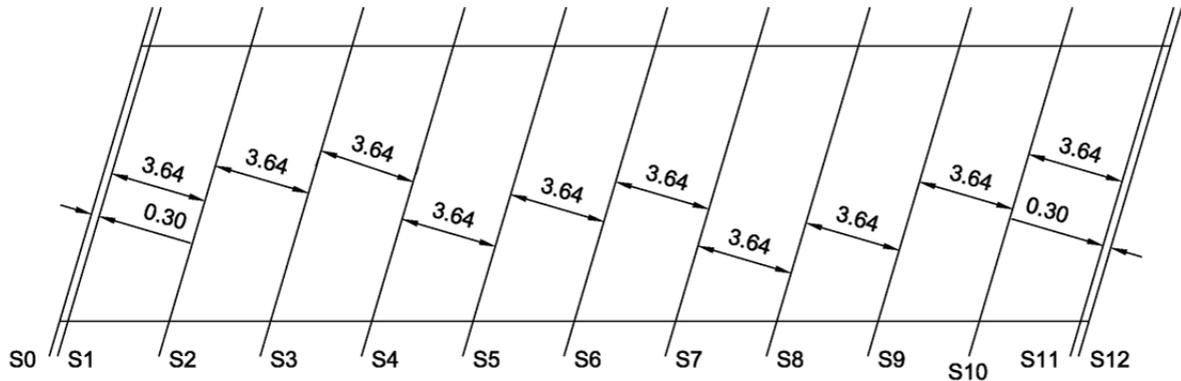


Figura 5.4 – Seção transversal típica no vão.

Fonte: DER/MG (2010).

Como é uma estrutura de apenas um vão e de pequeno comprimento, sua discretização consta de 13 seções transversais das quais se possui todas as características geométricas da peça bem como o posicionamento dos cabos de protensão (2 grupos de cabos, totalizando 8 cabos de

protensão). Os apoios de tal estrutura estão posicionados nas seções S1 e S11 mostradas na Fig. 5.5.



Dimensões em metros.

Figura 5.5 – Esquema da discretização longitudinal do viaduto.

Após o processamento dos dados, alguns dos resultados obtidos foram comparados aos contidos na memória de cálculo da estrutura considerando o tempo infinito como tempo final de análise.

5.4.2.1. Perdas de tensões na armadura ativa devido à retração e fluência do concreto

Tabela 5.8 – Comparação das perdas de tensão por retração e fluência na estrutura B.

Seção	ξ
0	0,89
1	0,89
2	0,89
3	0,89
4	0,90
5	0,91
6	0,91
7	0,91
8	0,90
9	0,89
10	0,89
11	0,89
12	0,89
Média	0,90
Desvio Padrão	0,01
Coefficiente de Variação (%)	0,93

5.4.2.2. Perdas de tensões na armadura ativa devido à relaxação do aço.

Tabela 5.9 – Comparação das perdas de tensão por relaxação do aço na estrutura B.

Seção	ξ
0	1,22
1	1,21
2	1,23
3	1,23
4	1,22
5	1,22
6	1,22
7	1,22
8	1,22
9	1,23
10	1,23
11	1,21
12	1,22
Média	1,22
Desvio Padrão	0,01
Coefficiente de Variação (%)	0,58

5.4.2.3. Tensão final na armadura ativa

Tabela 5.10 – Comparação das tensões finais nas armaduras ativas na estrutura B.

Seção	Razão matemática (ξ)	
	Grupos de cabos	
	G1	G2
0	0,99	1,00
1	0,99	1,00
2	0,99	0,99
3	0,99	0,99
4	0,98	0,99
5	0,98	0,99
6	0,98	0,99
7	0,98	0,99
8	0,98	0,99
9	0,99	0,99
10	0,99	0,99
11	0,99	1,00
12	0,99	1,00
Média		0,99
Desvio Padrão		0,01
Coefficiente de Variação (%)		0,52

5.4.2.4. Esforços de protensão

Tabela 5.11 – Comparação dos esforços de protensão na estrutura B.

Seção	Razão matemática (ξ)		
	Nfp	Vfp	Mfp
Extremo do balanço a esquerda	0,99	0,99	1,00
Apoio 1	0,99	0,99	1,00
Meio do vão entre apoios 1 e 2	0,98	1,00	0,98
Apoio 2	0,99	0,99	1,00
Extremo do balanço a direita	0,99	0,99	1,00
Média			0,99
Desvio padrão			0,00
Coefficiente de Variação (%)			0,41

5.4.2.5. Tensões atuantes no concreto

Tabela 5.12 – Comparação das tensões atuantes no concreto na estrutura B.

Seção	Borda	Razão matemática (ξ)						
		Hipóteses de Carga *						
		CE-1	CE-2	CE-3	CE-4	CE-5	CE-6	CE-7
Extremo do balanço a esquerda	BS	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	BI	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Apoio 1	BS	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	BI	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Meio do vão entre apoios 1 e 2	BS	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	BI	0,97	0,64	1,17	1,04	1,17	1,07	1,17
Apoio 2	BS	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	BI	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Extremo do balanço a direita	BS	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	BI	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Média								1,00
Desvio padrão								0,06
Coefficiente de Variação (%)								5,70

5.4.2.6. Exigências quanto a fissuração

Através do processamento do modelo computacional a estrutura em questão foi analisada no que diz respeito as exigências quanto a fissuração preconizadas pela NBR 6118 (ABNT, 2007) sendo os resultados obtidos representados pela Tab. 5.13.

Tabela 5.13 – Verificação quanto a fissuração.

Tipo de Concreto Estrutural	Exigências Relativas à Fissuração	Combinação de Ações em Serviço a Utilizar	Status da Verificação
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	ELS-W wks0,2mm	Combinação Frequente (CF)	Efetuar Verificação
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)	ELS-F	Combinação Frequente (CF)	Atendida
	ELS-D	Combinação Quase Permanente (CQP)	Não Atendida
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)	ELS-F	Combinação Rara (CR)	Não Atendida
	ELS-D	Combinação Frequente (CF)	Não Atendida

De acordo com os resultados obtidos a protensão está classificada como do tipo parcial o que requer um cuidado especial com relação à fissuração da peça sob cargas de serviço.

5.4.2.7. Deslocamentos da estrutura

Após a determinação dos esforços iniciais e finais introduzidos pela protensão são apresentados os deslocamentos da estruturas relativos ao instante inicial e final com e sem consideração do efeito da protensão (Tab. 5.14).

Tabela 5.14 – Deslocamentos da estrutura B.

Seção	δ_1 - Deslocamentos iniciais sem protensão (cm)	δ_2 - Deslocamentos iniciais com protensão (cm)	δ_3 - Deslocamentos finais sem protensão (cm)	δ_4 - Deslocamentos finais com protensão (cm)
1/5 do vão central	-1,86	-0,35	-6,49	-2,37
meio do vão central	3,18	-0,64	-11,11	-4,16
4/5 do vão central	-1,86	-0,35	-6,49	-2,37

Deslocamentos negativos indicam que o ponto analisado se encontra abaixo do eixo da estrutura indeformada

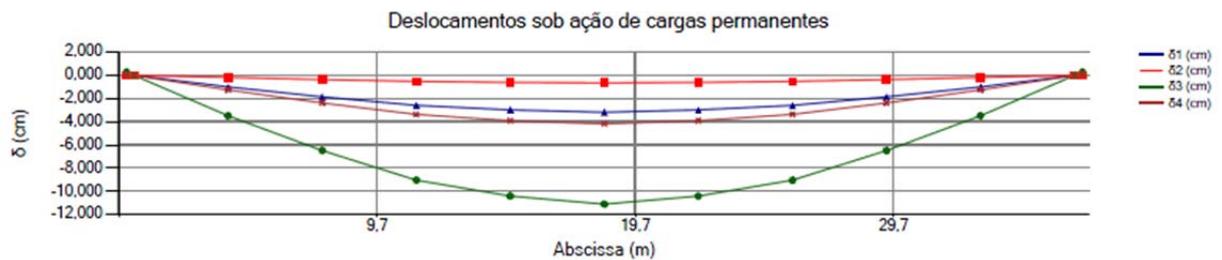


Figura 5.6 – Deslocamentos da estrutura B.

Dos resultados apresentados na Tab. 5.14 e na Fig. 5.6 observa-se que apesar de apresentar deslocamento máximo menor do que o limite visual preconizado pela norma NBR 6118 (ABNT, 2007) de $L/250$, o comportamento da estrutura em relação aos deslocamentos sob ação das cargas permanentes melhorou com a consideração da protensão passando de uma flecha máxima de aproximadamente $L/328$ (-11,11 cm) para $L/875$ (-4,16 cm).

5.4.3. Conclusões

De acordo com os resultados apresentados para a estrutura de 4 apoios quanto ao atendimentos dos limites de tensão bem como em relação a fissuração e, levando em conta que se trata de um estrutura com mais de 25 anos de existência e que não apresenta sinais de fissuras sob cargas de serviço, os resultados do modelo matemático proposto estão em de acordo com a situação real da estrutura.

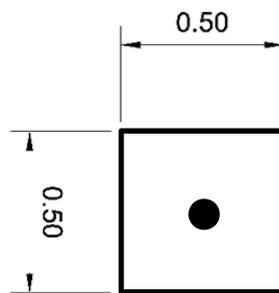
Como esperado a comparação dos resultados revelou diferença dos valores relativos às perdas de tensão na armadura ativa devido aos efeitos de fluência e retração do concreto e relaxação do aço. Tais diferenças podem ser atribuídas às mudanças nas metodologias matemáticas normativas para previsão das propriedades dependentes do tempo no concreto estrutural como, por exemplo, na lei de crescimento da resistência à compressão do concreto e também no aumento do fator de intensidade da relaxação pura do aço.

Com relação aos deslocamentos confirmou-se a eficiência da protensão excêntrica no combate das flechas na estruturas uma vez que sua correta utilização geralmente a minimiza.

5.5. Ensaio de Lundqvist e Riihimäki (2010)

5.5.1. Perdas de tensões totais na armadura ativa: Vigas 1 e 2

Tratam-se de vigas de seção constante, com cabos de protensão centrados (Fig. 5.7) que seriam utilizadas em instalações nucleares que ficaram armazenadas por mais de 30 anos sob temperaturas constantes.



Dimensões em metros.

Figura 5.7 – Esquema da discretização longitudinal da viga.

Devido ao fato do pequeno comprimento das peças (3,0 m) e da utilização de ancoragens ativas, foram inseridos calços entre a cabeça e a placa de ancoragem para diminuir e/ou eliminar a perda devido ao escorregamento do dispositivo de ancoragem.

Como esse artifício não é garantia de total eliminação do deslocamento do cabo quando da sua cravação, foram efetuados cálculos considerando 3 situações distintas onde se consideram escorregamentos (δ) de 0,0 mm, 1,0 mm e 1,5 mm. Os resultados das perdas de tensão de protensão na seção de simetria da estrutura, para as três hipóteses de escorregamento, estão representados de forma comparativa ao obtido em ensaio na Tab. 5.15. Os demais dados dos modelos se encontram nos apêndices C, D e E.

Tabela 5.15 – Comparação das perdas de tensões de protensão das vigas 1 e 2.

-	$\delta = 0,00$ mm	$\delta = 1,00$ mm	$\delta = 1,50$ mm	Ensaio
Perdas de Tensões Totais Médias (%)	25,2	32,6	36,2	38,0
Razão Matemática (ξ)	0,66	0,86	0,95	-

5.5.2. Conclusões

Através da análise dos dados comparativos nota-se a grande importância das perdas de tensão na armadura ativa por escorregamento do cabo no dispositivo de ancoragem para cabos de pequeno comprimento. Considerando a situação intermediária ($\delta=1,0$ mm) os resultados ficam 14,0% menores do que os obtidos nos ensaios o que é satisfatório em função das incertezas quanto ao deslocamento ou não dos cabos.

5.6. Resultados teóricos de Almeida et al. (2003)

Trata-se de uma estrutura protendida isostática de seção caixão constante contendo cabos de protensão parabólicos e simétricos em relação à abscissa média do eixo longitudinal da peça conforme as Figs. 5.8 e 5.9. Tal estrutura foi calculada de acordo com as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2007) e seus resultados foram comparados aos obtidos utilizando a formulação proposta considerando o tempo infinito como sendo o tempo final de análise.

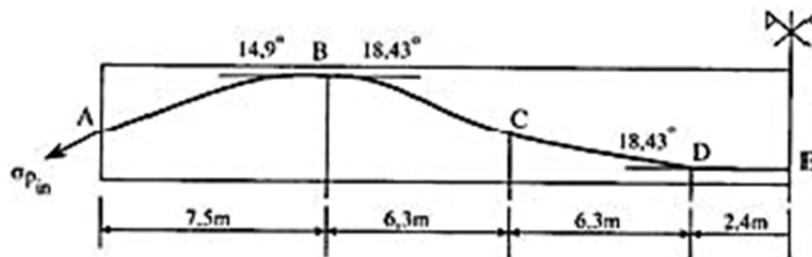


Figura 5.8 – Esquema da discretização longitudinal da estrutura.

Fonte: Almeida *et al.* (2003).

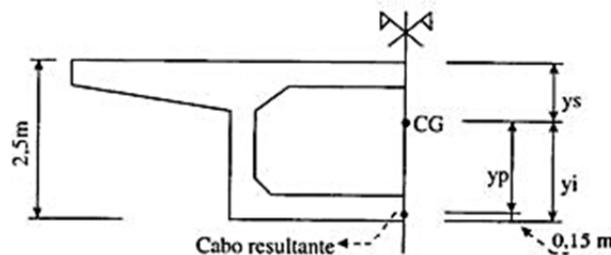


Figura 5.9 – Seção transversal típica e posicionamento do cabo resultante.

Fonte: Almeida *et al.* (2003).

Os demais dados referentes ao modelo matemático se encontram no apêndice F.

5.6.1. Perdas de tensões na armadura ativa devido ao atrito do cabo com as bainhas

Tabela 5.16 – Comparação das tensões de protensão do viaduto após as perdas por atrito.

Seção	ξ
0	1,00
1	0,99
2	0,99
3	0,98
4	0,96
5	0,98
6	0,99
7	0,99
8	1,00
Média	0,99
Desvio Padrão	0,01
Coefficiente de variação	1,20

5.6.2. Comprimento de ancoragem e tensão instalada na extremidade do cabo

Tabela 5.17 – Comparação do comprimento de ancoragem e tensão instalada.

Item	ξ
Comprimento de ancoragem	0,95
Alongamento do cabo/extremidade	1,00
Tensão ancorada na extremidade	0,98

5.6.3. Perdas de tensão na armadura ativa devido ao encurtamento elástico do concreto e tensão final na seção de simetria da estrutura

Tabela 5.18 – Comparação das perdas de tensão devido ao encurtamento elástico do concreto e tensão final na seção de simetria da estrutura.

Item	ξ
Δ encurtamento	0,98
Tensão Final na armadura ativa	1,00

5.6.4. Conclusões

Analisando os valores apresentados nos itens 5.6.1 e 5.6.2 vê-se que para este caso o fato de se considerar a formulação simplificada para perda de atrito (linear e distribuída ao longo do cabo ao invés de exponencial dividida em trechos) geram diferenças de no máximo 4% nos valores.

Sendo assim conclui-se que o modelo matemático proposto em muito se aproxima aos valores apresentados através do uso da formulação integral da NBR 6118 (ABNT, 2007) sendo portanto válido sob a perspectiva normativa para efeito de cálculos de estruturas de concreto protendido em serviço.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como nos dias de hoje o uso de implementações computacionais para auxílio no projeto de estruturas é de extrema importância para elaboração de projetos mais confiáveis, de baixo custo de desenvolvimento e também para o aumento da competitividade das empresas, foi apresentado neste trabalho uma metodologia de análise das estruturas de concreto protendido.

Em paralelo, também foi desenvolvido neste trabalho uma ferramenta de auxílio com base nas formulações normativas da NBR 6118 (ANBT, 2007) e também de diversos métodos matemáticos a fim de se caracterizar o comportamento de estruturas de concreto protendido com uso de cordoalhas aderentes pós-tracionadas constituídas de vigas retas com número qualquer de apoios bem como características geométricas quaisquer em serviço.

Tal ferramenta pretendeu contribuir em alguns aspectos no campo dos projetos de estruturas de concreto protendido tais como:

- Padronizar e facilitar a definição do traçado dos cabos de protensão uma vez que são definidos por trechos compostos de retas ou funções de segundo grau definidas por pontos chamados notáveis (geralmente localizados próximos ou coincidentes às seções com maiores solicitações externas);
- Automatizar de maneira eficaz e seguindo os requisitos normativos vigentes, os cálculos das tensões finais nas armaduras ativas das estruturas;

- Computar as tensões atuantes nas bordas superior e inferior das seções transversais de concreto da estrutura tanto para as combinações previstas pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2007) quanto para combinações quaisquer previstas pelo usuário;
- Prover uma documentação de cálculo da estrutura contendo todos os dados de entrada e os dados relativos às etapas de cálculo;
- Proporcionar uma rápida identificação de não atendimento dos requisitos de tensões atuantes no concreto através de indicadores na interface gráfica;
- Classificar a estrutura quanto ao grau de protensão preconizado pela NBR 6118 (ABNT, 2007).

A implementação computacional em sua interface gráfica, procura gerar uma relação “amigável” com o usuário detectando erros em tempo de execução para que os mesmos sejam de fácil localização tornando a tarefa de entrada de dados menos maçante.

Como fator de avaliação das tendências normativas a respeito dos efeitos do tempo sobre a tensão atuante nas estruturas de concreto protendido, os resultados obtidos usando-se a formulação aqui exposta foram comparados com os valores obtidos usando-se a formulação proposta por Pereira (1987).

A comparação com tal formulação matemática se deu após a observação dos dados resultantes da análise de 2 estruturas com diferentes características geométricas bem com diferentes números de apoio e por ela nota-se:

- Todos os dados analisados apresentaram baixa variabilidade ($COV \leq 10\%$);
- Com relação a média dos valores os resultados das perdas por tensão na armadura ativa devido a retração fluência do concreto encontrados foram 13% menores enquanto que os resultados das perdas de tensão devido a relaxação foram 19% maiores.

Com base na comparação dos resultados obtidos nota-se uma tendência normativa de diminuição da influência dos efeitos da retração e fluência do concreto sobre a tensão final de protensão e em contrapartida um aumento da influência do efeito da relaxação do aço sobre o mesmo quesito (devido ao aumento de $\psi_{(t,\infty)}$), porém, sem afetar o efeito em conjunto, ou seja, a perda de tensão diferida é praticamente a mesma.

De forma esperada, a partir da análise dos deslocamentos da estrutura sob ação das cargas permanentes observa-se a melhora no comportamento da estrutura com a consideração dos efeitos da protensão o que demonstra a real efetividade do artifício da protensão de estruturas em relação às flechas.

Paralelamente foram feitas comparações com resultados obtidos por Lundqvist e Riihimäki (2010) onde nota-se uma diferença média de 17,5% entre os valores previstos pelo modelo matemático e o ensaio experimental sendo o último a apresentar valores maiores de perdas expressas em porcentagem.

A diferença de valores apresentada nesta comparação pode ser explicada pelo fato da não consideração do escorregamento do cabo no dispositivo de ancoragem que apesar de apresentar calços em suas extremidades para impedir o deslocamento, não garante que todo o retrocesso do cabo será impedido visto que o mesmo não tem valor constante variando de caso a caso.

No caso das peças analisadas nota-se que considerando um escorregamento do cabo no dispositivo de ancoragem igual a 1,5 mm, ou seja, 25% do valor recomendado pelo fabricante do dispositivo de ancoragem (6,0 mm), as perdas totais seriam em média 5,0% menores do que as aferidas em ensaio.

Para efeito de validação teórica os resultados de uma estrutura calculada usando-se a formulação integral da NBR 6118 (ABNT, 2007) foram comparado aos obtidos pelo modelo proposto gerando resultados muito satisfatórios, sendo a maior diferença encontrada na perda de tensão da armadura ativa devido ao atrito entre o cabo e a bainha (4% para menos em relação a formulação da norma brasileira).

Por fim, como sugestões para continuidade do presente trabalho propõem-se:

- Consideração da perda de tensão por atrito entre o cabo de protensão e a bainha utilizando a formulação exponencial proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2007);
- Estudo do efeito da temperatura sobre o fenômeno da relaxação em armaduras ativas do tipo RN;
- Incluir a possibilidade de análise de estruturas compostas com uso de concretos de diferentes idades como, por exemplo, nas pontes rodoviárias com vigas pré-moldadas onde a laje é incorporada após a montagem das vigas;

- Verificação dos estados limites últimos das estruturas com verificações de segurança à ruptura;
- Cálculo dos deslocamentos considerando o efeito das cargas móveis sobre as estruturas.

REFEÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D.F.C.; LOPES, M.T.A.; BARBOSA, P. *Perdas da Força de Protensão Obedecendo aos Critérios da Nova Norma NBR 6118-2003*. Engevista, v. 5, n. 10, p. 56-70, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 8953. *Concretos para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência - Classificação*. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6118. *Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 8681. *Ações e segurança nas estruturas – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2004.

BUCHAIM, R. *O Concreto Protendido*. 1ª Edição. Londrina, Brasil: EDUEL – Editora da Universidade Estadual de Londrina, 2007.

CARVALHO, R. C. *Estruturas em Concreto Protendido – Pré-Tração – Pós-Tração – Cálculo e Detalhamento*. 1ª Edição. São Paulo, Brasil: Pini, 2012.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. *Concreto Protendido – Teoria e Prática*. 1ª Edição. São Paulo, Brasil: Pini, 2013.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. *Code-modèle CEB/FIP pour les Structures en Béton (Bulletin d'Information 124/125)*. Paris, França, 1978.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGENS DO ESTADO DE MINAS GERAIS.
*Projeto de engenharia rodoviária para melhoramentos e pavimentação – Anexo 3C -
Memória justificativa de cálculo de OAE – Viaduto sobre a FCA.* Brasil, 2010.

EMERICK, A. A. *Projeto e Execução de Lajes Protendidas.* 1ª Edição. Brasília, Brasil:
Interciência, 2005.

FERRAZ, J. C. F. *Curso de Concreto Protendido.Estrutura – Revista Técnica das
Construções*, ano 2, v. 2, n. 08, p. 562–570, 1958a.

FERRAZ, J. C. F. *Curso de Concreto Protendido.Estrutura – Revista Técnica das
Construções*, ano 2, v. 3, n. 09, p. 87–98, 1958b.

GUYON, Y. *Sistemas Hiperestáticos de Concreto Protendido.* Estrutura – Revista Técnica
das Construções, ano 6, v. 11, n. 47, p. 161–195, 1962a.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais.* Tradução: Arlete Simille Marques; Revisão
Técnica: Sebastião Simões da Cunha Jr. 7ª Edição. São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall,
2010.

LEONHARDT, F. *Construções de Concreto: vol.6: Concreto Protendido.* Tradução de João
Luís Escosteguy Merino. Rio de Janeiro, Brasil: Editora Interciência, 1983.

LUNDQVIST, P.; RIHIIMÄKI, J. *Testing of five 30-year-old prestressed concrete beams,
PCI Journal*, v. 55, n. 4, p. 50-58, 2010.

MACHADO, C. F. *A injeção no Concreto Protendido. Estrutura – Revista Técnica das
Construções*, ano 9, v. 14, n. 55, p. 17–32, 1965.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P; *Noções de Probabilidade e Estatística.* 6ª Edição
revista, 1ª Reimpressão. São Paulo, Brasil: Editora da Universidade de São Paulo, 2007.

MARTHA, L. F. R.; *Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos.* 2ª Reimpressão.
Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2010.

PEREIRA, S. S. R. *SVTSCP: Um Sistema para Verificação de Tensões em Seções em
Concreto Protendido.* Dissertação (Mestrado) — UFMG – Universidade Federal de Minas
Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, agosto 1987.

PEREIRA, S. S. R. *SAPBS: Um Sistema para Análise do Comportamento em Serviço de Pontes Protendidas em Balanços Sucessivos*. Tese (Doutorado) — UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

PFEIL, W. *Concreto Protendido: Processos Construtivos, Perdas de Protensão, Sistemas Estruturais*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1980.

PFEIL, W. *Concreto Protendido: Processos Construtivos, Perdas de Protensão*. 2ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1983.

PFEIL, W. *Concreto Protendido: Introdução*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984a.

PFEIL, W. *Concreto Protendido: Dimensionamento à Flexão*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984b.

PFEIL, W. *Concreto Armado: Introdução – Constituição e Propriedades, Sistemas Estruturais e Critérios de Dimensionamento*. 5ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1988.

PROTENDE. *Catálogo Protende – Sistema Tensacciai*. São Paulo, Brasil.

ROSTÁSY, F. S.; THIENEL, K.-CH.; SCHÜTT, K.: *On prediction of relaxation of colddrawn prestressing wire under constant and variable elevated temperature*. *Nuclear Engineering and Design*, v. 130, p. 221-227, 1991.

SINGH, B.P.; YAZDANI, N.; RAMIREZ, G; *Effect of a Time Dependent Concrete Modulus of Elasticity on Prestress Losses in Bridge Girders*. *Internacional Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 53, p. 183-191, 2013.

SCHMID, M. R. L. *Um pouco da História do uso do Aço no Concreto Protendido no Brasil e no Mundo*. *Revista Concreto*, n. 50 – Abril/Maio/Junho, p. 50–55, 2008.

SCHMID, M. T. *Lajes Planas Protendidas*. São Paulo, Brasil: Rudloff-VSL Industrial LTDA., 1993.

APÊNDICE A

RELATÓRIO DE CÁLCULO – ESTRUTURA A – 4 APOIOS

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Dados Iniciais

Número de Apoios: 4

Número de Seções: 33

Número de Propriedades Geométricas: 21

Número de Grupos de Cabos de Protensão: 12

Número de Combinações Adicionais: 7

Tipo de Estrutura: Passarela de Pedestre

Apoios

Número do Apoio	Abcissa do Apoio	Nome do Apoio
1	0,200	A1
2	28,000	A2
3	90,000	A3
4	129,800	A4

Características Geométricas das Seções

Número da Seção	Abcissa (m)	Área (m ²)	Inércia (m ⁴)	Altura (m)	Ycg (m)	Perímetro (m)
0	0,000	1,700	0,127	0,950	0,461	5,445
1	0,200	1,700	0,127	0,950	0,461	5,445
2	2,980	1,735	0,135	0,970	0,471	5,484
3	5,760	1,475	0,147	1,020	0,493	5,581
4	8,540	1,175	0,167	1,100	0,530	5,738
5	11,320	1,234	0,215	1,210	0,584	5,954
6	14,100	1,328	0,292	1,360	0,657	6,250
7	16,880	1,436	0,405	1,540	0,745	6,606
8	19,660	1,561	0,566	1,750	0,848	7,023
9	22,440	1,863	0,853	2,000	0,971	7,520
10	25,220	2,363	1,334	2,280	1,109	8,077
11	28,000	2,891	1,952	2,550	1,242	8,615
12	34,200	2,260	1,162	2,170	1,055	7,858
13	40,400	1,762	0,701	1,860	0,902	7,242
14	46,600	1,489	0,470	1,630	0,789	6,785
15	52,800	1,412	0,378	1,500	0,725	6,527
16	59,000	1,382	0,346	1,450	0,701	6,428
17	65,200	1,412	0,378	1,500	0,725	6,527
18	71,400	1,489	0,467	1,630	0,789	6,785
19	77,600	1,762	0,701	1,860	0,902	7,242
20	83,800	2,260	1,162	2,170	1,055	7,858
21	90,000	2,891	1,952	2,550	1,242	8,615
22	93,980	2,363	1,333	2,280	1,109	8,077
23	97,960	1,863	0,853	2,000	0,971	7,520
24	101,940	1,561	0,566	1,750	0,848	7,023
25	105,920	1,436	0,405	1,540	0,745	6,606
26	109,900	1,328	0,292	1,360	0,657	6,250
27	113,880	1,234	0,215	1,210	0,584	5,954
28	117,860	1,175	0,167	1,100	0,530	5,738
29	121,840	1,475	0,147	1,020	0,493	5,581
30	125,820	1,735	0,135	0,970	0,471	5,484
31	129,800	1,700	0,127	0,950	0,461	5,445
32	130,000	1,700	0,127	0,950	0,461	5,445

Envoltória de Momentos Fletores

Número da Seção	Mg-1 (KNm)	Mg-2 (KNm)	Mmáx (KNm)	Mmin (KNm)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	48,000	13,000	271,000	-240,000
3	-243,000	1,000	483,000	-479,000
4	-891,000	-36,000	636,000	-719,000
5	-1.625,000	-98,000	731,000	-959,000
6	-2.673,000	-186,000	766,000	-1.198,000
7	-3.981,000	-299,000	743,000	-1.438,000
8	-5.569,000	-437,000	662,000	-1.678,000

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Envoltória de Momentos Fletores

Número da Seção	Mg-1 (KNm)	Mg-2 (KNm)	Mmáx (KNm)	Mmin (KNm)
9	-7.469,000	-601,000	569,000	-1.966,000
10	-9.740,000	-789,000	524,000	-2.360,000
11	-12.472,000	-1.003,000	540,000	-2.874,000
12	-5.193,000	-462,000	457,000	-1.528,000
13	-128,000	-46,000	550,000	-657,000
14	3.180,000	245,000	844,000	-280,000
15	5.001,000	409,000	1.320,000	-380,000
16	5.444,000	448,000	1.515,000	-490,000
17	4.498,000	361,000	1.418,000	-600,000
18	2.175,000	149,000	1.028,000	-711,000
19	-1.637,000	-189,000	541,000	-1.017,000
20	-7.205,000	-653,000	250,000	-1.811,000
21	-14.986,000	-1.243,000	185,000	-3.131,000
22	-10.446,000	-885,000	221,000	-2.329,000
23	-6.848,000	-580,000	349,000	-1.741,000
24	-4.011,000	-326,000	563,000	-1.359,000
25	-1.814,000	-124,000	823,000	-1.143,000
26	-191,000	26,000	987,000	-953,000
27	901,000	125,000	1.031,000	-762,000
28	1.495,000	171,000	951,000	-572,000
29	1.618,000	166,000	756,000	-381,000
30	1.157,000	109,000	438,000	-191,000
31	0,000	0,000	0,000	0,000
32	0,000	0,000	0,000	0,000

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000
21	0,000	0,000	0,000	0,000
22	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0,000	0,000	0,000	0,000
24	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,000	0,000	0,000	0,000
26	0,000	0,000	0,000	0,000
27	0,000	0,000	0,000	0,000
28	0,000	0,000	0,000	0,000

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
29	0,000	0,000	0,000	0,000
30	0,000	0,000	0,000	0,000
31	0,000	0,000	0,000	0,000
32	0,000	0,000	0,000	0,000

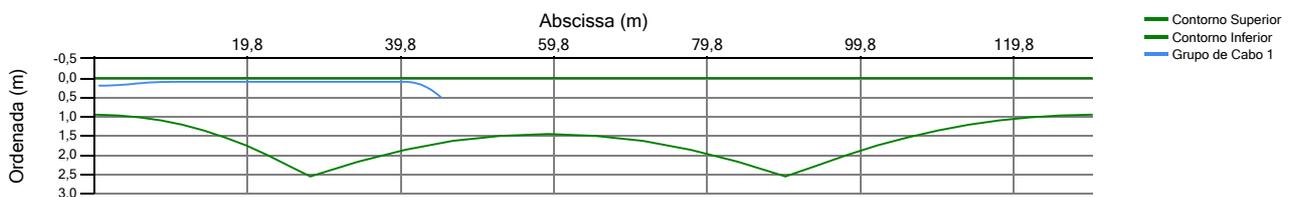
Dados de Protensão

Módulo de Elasticidade Longitudinal do Aço: 195.000,00 MPa
 Resistência Característica à Tração do Aço (f_{ptk}): 1.750,00 MPa
 Tipo de Cordoalhas: RB
 Coeficiente de Atrito entre o Cabo e a Bainha: 0,25
 Perda de Atrito por Metro: 0,25 % /m
 Escorregamento na Ancoragem: 0,006 m
 Umidade Relativa do Ar: 70,00 %
 Temperatura Ambiente: 20,00 °C
 Data da Protensão: 15,00 dias
 Nome do Material do Aço de Protensão: AP-1
 Slump do Concreto: 8,00 cm
 Data de Início da Cura do Concreto: 7,00 dias
 Resistência Característica à Compressão do Concreto (f_{ck}): 27,00 MPa
 Tipo de Cimento: CP-II
 Tempo de Análise: infinito
 Nome do Material Concreto: Concreto-C27

Grupos de Cabos de ProtensãoGrupo 1 - G1

Área de Aço: 11,30 cm²
 Número de Cabos: 2
 Tensão Inicial: 1.380,00 MPa
 Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades
 Desvio Angular Horizontal: 10,00°
 Número de Pontos Notáveis: 5
 Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	0,20
2	4,96	Ponto de Inflexão
3	9,93	0,10
4	40,50	0,10
5	45,05	0,50

Grupo 2 - G2

Área de Aço: 11,30 cm²
 Número de Cabos: 2
 Tensão Inicial: 1.380,00 MPa
 Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades
 Desvio Angular Horizontal: 10,00°
 Número de Pontos Notáveis: 6
 Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	0,47

Grupos de Cabos de ProtensãoGrupo 2 - G2Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

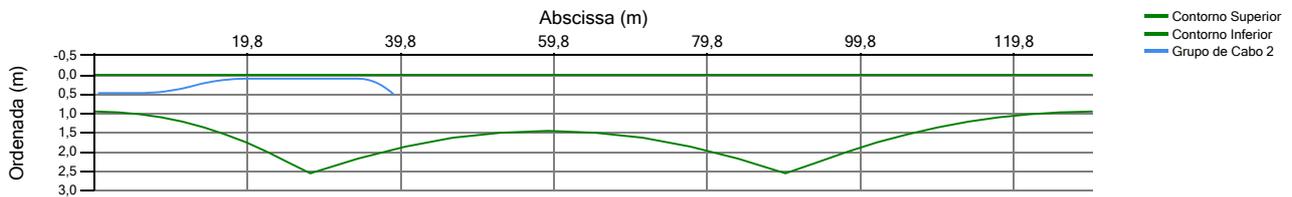
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 6

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
2	5,76	0,47
3	12,71	Ponto de Inflexão
4	19,66	0,10
5	34,30	0,10
6	38,85	0,50

Grupo 3 - G3Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

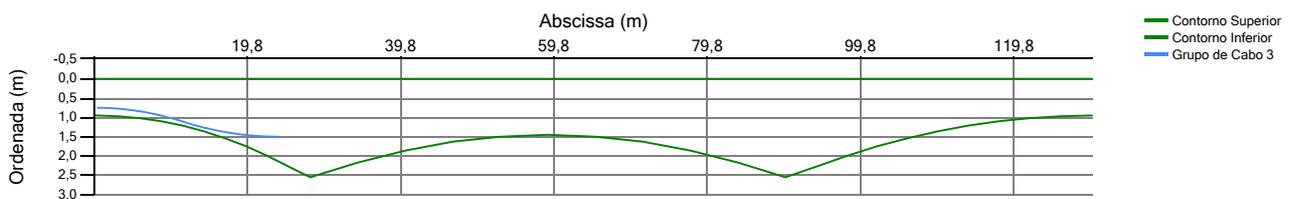
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 3

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	0,75
2	11,32	Ponto de Inflexão
3	23,83	1,50

Grupo 4 - G4Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 10

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	15,49	0,50
2	18,44	0,24
3	31,10	0,24
4	37,30	Ponto de Inflexão

Grupos de Cabos de Protensão

Grupo 4 - G4

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

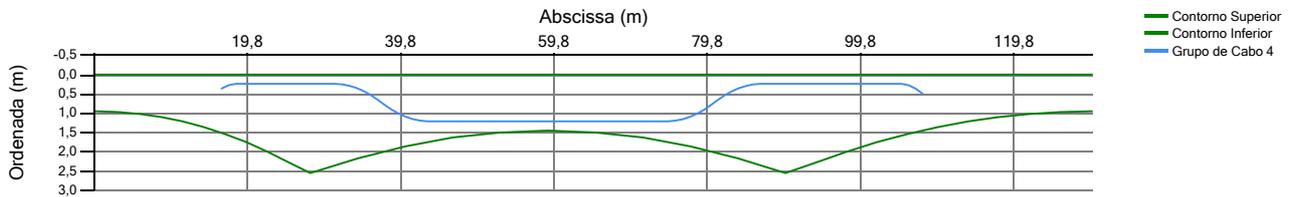
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 10

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
5	43,50	1,21
6	74,50	1,21
7	80,70	Ponto de Inflexão
8	86,90	0,24
9	104,96	0,24
10	107,91	0,50



Grupo 5 - G5

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

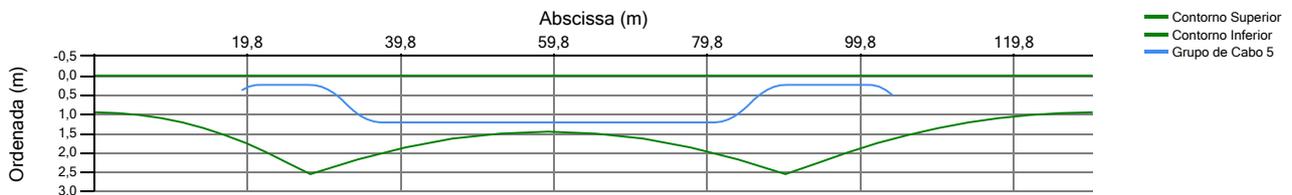
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 10

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	18,27	0,50
2	21,22	0,24
3	28,00	0,24
4	32,65	Ponto de Inflexão
5	37,30	1,21
6	80,70	1,21
7	85,35	Ponto de Inflexão
8	90,00	0,24
9	100,98	0,24
10	103,93	0,50



Grupo 6 - G6

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Grupos de Cabos de ProtensãoGrupo 6 - G6Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

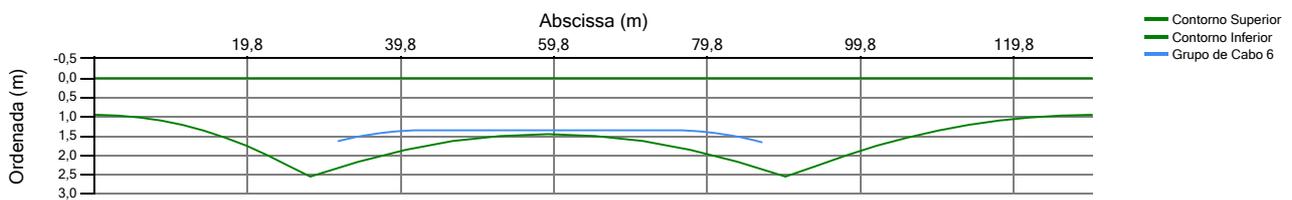
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 4

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	31,10	1,66
2	42,95	1,35
3	75,05	1,35
4	86,90	1,66

Grupo 7 - G7Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

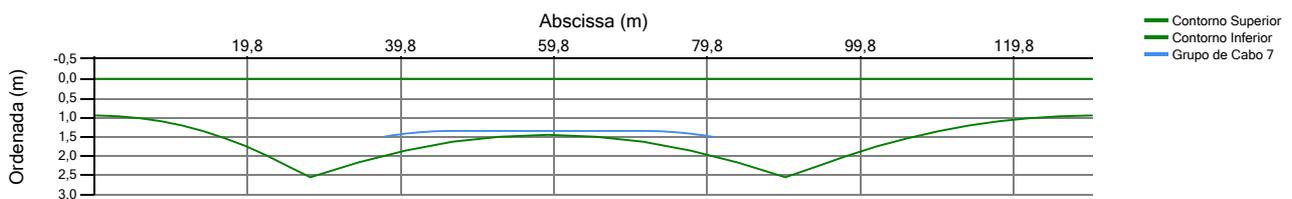
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 4

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	37,30	1,51
2	46,75	1,35
3	71,25	1,35
4	80,70	1,51

Grupo 8 - G8Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

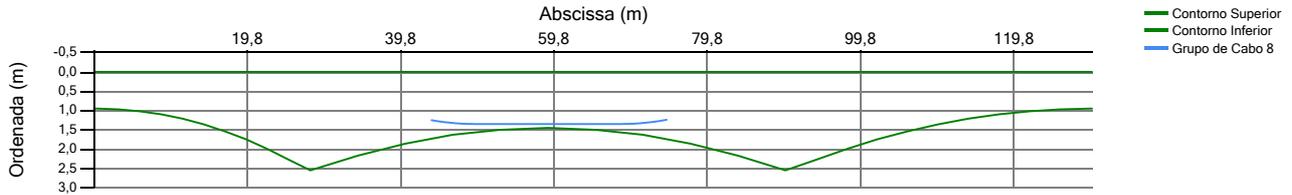
Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 4

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	43,50	1,24
2	49,50	1,35
3	68,50	1,35
4	74,50	1,24

Grupos de Cabos de Protensão



Grupo 9 - G9

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

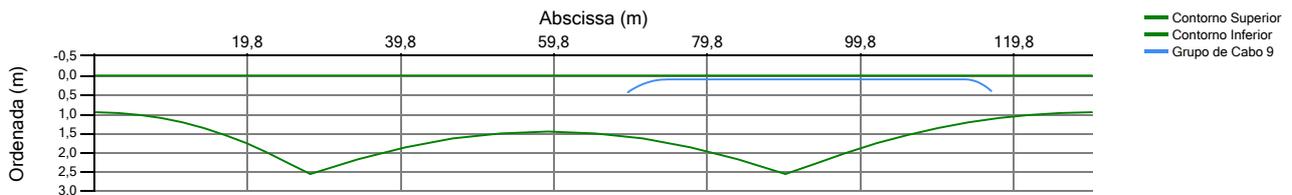
Modo de Protensão: Cabo protendido pela extremidade esquerda

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 4

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	68,95	0,50
2	74,40	0,10
3	113,46	0,10
4	116,86	0,40



Grupo 10 - G10

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

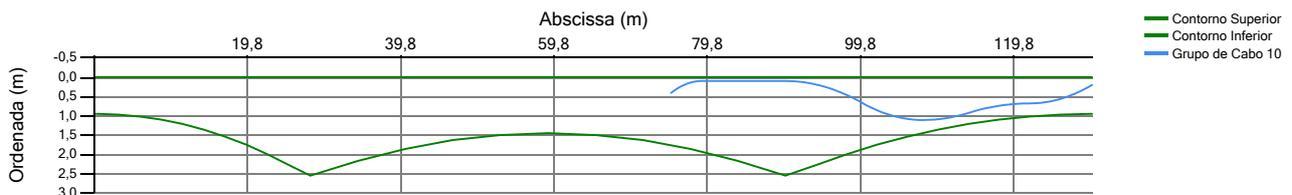
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 8

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	74,50	0,50
2	79,05	0,10
3	90,00	0,10
4	99,95	Ponto de Inflexão
5	107,91	1,11
6	113,88	Ponto de Inflexão
7	121,84	0,68
8	130,00	0,20



Grupo 11 - G11

Área de Aço: 11,30 cm²

Grupos de Cabos de ProtensãoGrupo 11 - G11Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

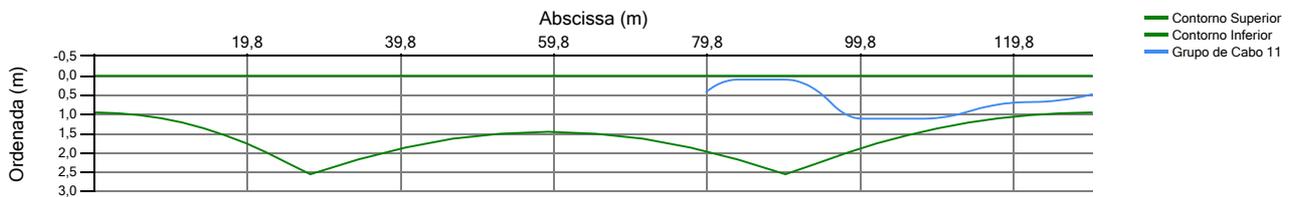
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 9

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	79,15	0,50
2	83,70	0,10
3	90,00	0,10
4	95,97	Ponto de Inflexão
5	99,95	1,11
6	107,91	1,11
7	113,88	Ponto de Inflexão
8	121,84	0,68
9	130,00	0,48

Grupo 12 - G12Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

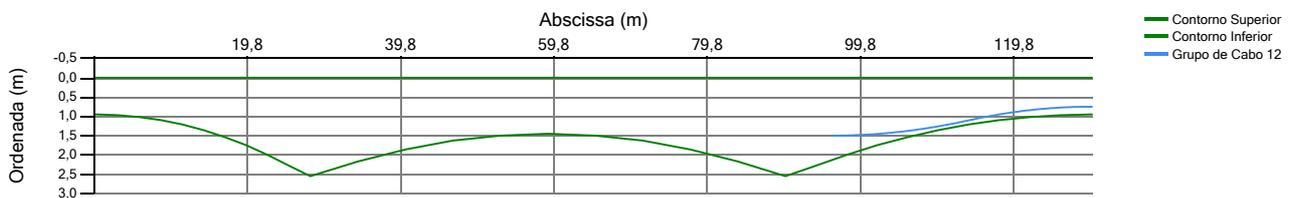
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 10,00°

Número de Pontos Notáveis: 3

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	95,97	1,50
2	113,88	Ponto de Inflexão
3	130,00	0,75

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas SeçõesGrupo 1 - G1Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 0,00°

Ângulo no Final do Cabo: -9,97°

Variação Angular Vertical: 12,28°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 45,05 m

Comprimento Total do Cabo: 45,07 m

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 1 - G1

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 0,00°

Ângulo no Final do Cabo: -9,97°

Variação Angular Vertical: 12,28°

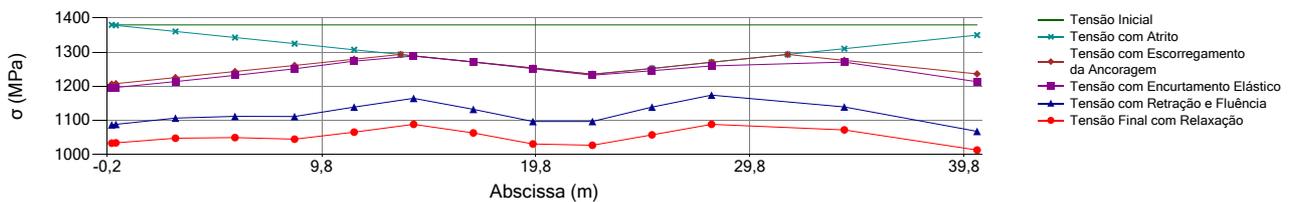
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 45,05 m

Comprimento Total do Cabo: 45,07 m

Alongamento do Cabo: 15,11 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 13,49 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
0	0,20	0,00	0,0	1.380,0	-173,4	-11,2	1.195,4	-107,7	-53,8	1.033,9	25,1
1	0,20	0,05	-1,3	1.378,7	-170,9	-11,2	1.196,7	-107,8	-54,1	1.034,8	25,0
2	0,18	0,69	-19,2	1.360,8	-135,1	-11,5	1.214,2	-107,2	-58,6	1.048,3	24,0
3	0,14	0,97	-37,0	1.343,0	-99,4	-11,4	1.232,2	-119,8	-62,5	1.049,9	23,9
4	0,10	0,32	-54,9	1.325,1	-63,7	-10,1	1.251,4	-139,7	-66,4	1.045,3	24,3
5	0,10	0,00	-72,8	1.307,2	-27,9	-5,3	1.274,0	-134,6	-73,2	1.066,2	22,7
6	0,10	0,00	-90,6	1.289,4	0,0	-0,5	1.288,9	-123,8	-76,2	1.088,9	21,1
7	0,10	0,00	-108,5	1.271,5	0,0	-0,4	1.271,1	-138,2	-69,0	1.063,8	22,9
8	0,10	0,00	-126,4	1.253,6	0,0	-1,6	1.252,0	-154,9	-65,8	1.031,3	25,3
9	0,10	0,00	-144,2	1.235,8	0,0	-2,8	1.233,0	-135,6	-69,8	1.027,5	25,5
10	0,10	0,00	-127,5	1.252,5	0,0	-6,9	1.245,6	-106,3	-81,3	1.058,0	23,3
11	0,10	0,00	-109,6	1.270,4	0,0	-10,6	1.259,8	-85,6	-85,1	1.089,0	21,1
12	0,10	0,00	-69,7	1.310,3	-34,0	-5,3	1.271,0	-131,1	-67,3	1.072,7	22,3
13	0,10	0,00	-29,9	1.350,1	-113,7	-22,6	1.213,8	-145,7	-54,6	1.013,5	26,6



Grupo 2 - G2

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 0,00°

Ângulo no Final do Cabo: -9,97°

Variação Angular Vertical: 16,07°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 38,85 m

Comprimento Total do Cabo: 38,88 m

Alongamento do Cabo: 13,03 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 12,50 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
0	0,47	0,00	0,0	1.380,0	-187,2	-11,2	1.181,6	-107,7	-53,8	1.020,1	26,1
1	0,47	0,00	-1,5	1.378,5	-184,2	-11,2	1.183,1	-107,8	-54,1	1.021,2	26,0
2	0,47	0,00	-22,3	1.357,7	-142,6	-11,5	1.203,6	-107,2	-58,6	1.037,7	24,8
3	0,47	0,00	-43,1	1.336,9	-100,9	-11,4	1.224,5	-119,8	-62,5	1.042,3	24,5
4	0,44	1,22	-64,0	1.316,0	-59,3	-10,1	1.246,7	-139,7	-66,4	1.040,6	24,6
5	0,35	2,44	-84,8	1.295,2	-17,7	-5,3	1.272,2	-134,6	-73,2	1.064,4	22,9
6	0,22	2,44	-105,6	1.274,4	0,0	-0,5	1.273,9	-123,8	-76,2	1.074,0	22,2
7	0,13	1,22	-126,4	1.253,6	0,0	-0,4	1.253,1	-138,2	-69,0	1.045,9	24,2
8	0,10	0,00	-143,7	1.236,3	0,0	-1,6	1.234,7	-154,9	-65,8	1.014,0	26,5
9	0,10	0,00	-122,9	1.257,1	0,0	-2,8	1.254,3	-135,6	-69,8	1.048,8	24,0
10	0,10	0,00	-102,1	1.277,9	0,0	-6,9	1.271,0	-106,3	-81,3	1.083,4	21,5
11	0,10	0,00	-81,3	1.298,7	-24,7	-10,6	1.263,4	-85,6	-85,1	1.092,7	20,8

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

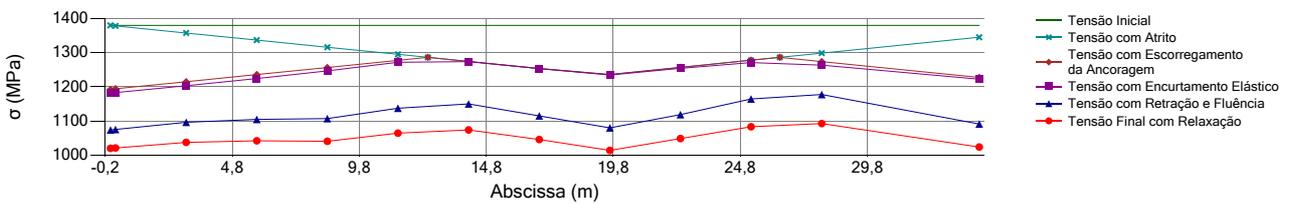
Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 2 - G2

Área de Aço: 11,30 cm²
 Número de Cabos: 2
 Tensão Inicial: 1.380,00 MPa
 Ângulo no Início do Cabo: 0,00°
 Ângulo no Final do Cabo: -9,97°
 Variação Angular Vertical: 16,07°
 Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 38,85 m
 Comprimento Total do Cabo: 38,88 m
 Alongamento do Cabo: 13,03 cm / extremidade com ancoragem ativa
 Comprimento de Ancoragem: 12,50 m

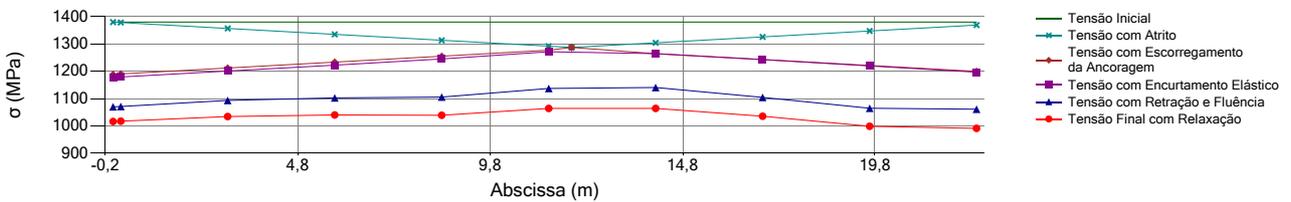
Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσ _{atr.} (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσ _{esc.} (MPa)	Δσ _{enc.} (MPa)	σ _{inst.} (MPa)	Δσ _{cs} (MPa)	Δσ _r (MPa)	σ _{fim} (MPa)	Δσ _i (%)
12	0,10	0,00	-34,8	1.345,2	-117,6	-5,3	1.222,3	-131,1	-67,3	1.024,0	25,8



Grupo 3 - G3

Área de Aço: 11,30 cm²
 Número de Cabos: 2
 Tensão Inicial: 1.380,00 MPa
 Ângulo no Início do Cabo: 0,00°
 Ângulo no Final do Cabo: 0,00°
 Variação Angular Vertical: 7,20°
 Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 23,83 m
 Comprimento Total do Cabo: 23,85 m
 Alongamento do Cabo: 8,15 cm / extremidade com ancoragem ativa
 Comprimento de Ancoragem: 11,92 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσ _{atr.} (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσ _{esc.} (MPa)	Δσ _{enc.} (MPa)	σ _{inst.} (MPa)	Δσ _{cs} (MPa)	Δσ _r (MPa)	σ _{fim} (MPa)	Δσ _i (%)
0	0,75	0,00	0,0	1.380,0	-191,1	-11,2	1.177,7	-107,7	-53,8	1.016,2	26,4
1	0,75	-0,06	-1,6	1.378,4	-188,0	-11,2	1.179,3	-107,8	-54,1	1.017,4	26,3
2	0,77	-0,95	-23,2	1.356,8	-144,6	-11,5	1.200,6	-107,2	-58,6	1.034,7	25,0
3	0,84	-1,83	-44,9	1.335,1	-101,3	-11,4	1.222,4	-119,8	-62,5	1.040,2	24,6
4	0,95	-2,72	-66,6	1.313,4	-57,9	-10,1	1.245,4	-139,7	-66,4	1.039,4	24,7
5	1,11	-3,60	-88,3	1.291,7	-14,6	-5,3	1.271,8	-134,6	-73,2	1.064,0	22,9
6	1,26	-2,80	-75,9	1.304,1	-39,4	-0,5	1.264,3	-123,8	-76,2	1.064,3	22,9
7	1,38	-2,00	-54,2	1.325,8	-82,7	-0,4	1.242,7	-138,2	-69,0	1.035,4	25,0
8	1,46	-1,20	-32,5	1.347,5	-126,1	-1,6	1.219,8	-154,9	-65,8	999,1	27,6
9	1,50	-0,40	-10,8	1.369,2	-169,4	-2,8	1.197,0	-135,6	-69,8	991,5	28,2



Grupo 4 - G4

Área de Aço: 11,30 cm²
 Número de Cabos: 2
 Tensão Inicial: 1.380,00 MPa
 Ângulo no Início do Cabo: 10,00°
 Ângulo no Final do Cabo: -10,00°

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 4 - G4

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 10,00°

Ângulo no Final do Cabo: -10,00°

Variação Angular Vertical: 55,56°

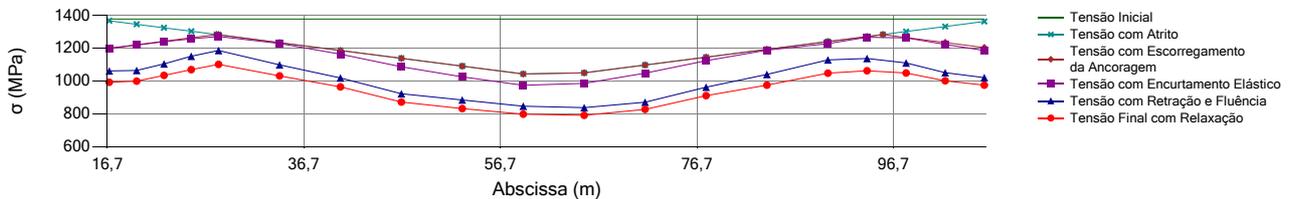
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 92,42 m

Comprimento Total do Cabo: 92,55 m

Alongamento do Cabo: 28,39 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 12,31 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
7	0,31	5,33	-10,7	1.369,3	-168,6	-0,4	1.200,2	-138,2	-69,0	992,9	28,0
8	0,24	0,00	-32,2	1.347,8	-125,7	-1,6	1.220,5	-154,9	-65,8	999,8	27,5
9	0,24	0,00	-53,7	1.326,3	-82,8	-2,8	1.240,8	-135,6	-69,8	1.035,3	25,0
10	0,24	0,00	-75,1	1.304,9	-39,8	-6,9	1.258,1	-106,3	-81,3	1.070,5	22,4
11	0,24	0,00	-96,6	1.283,4	0,0	-10,6	1.272,8	-85,6	-85,1	1.102,0	20,1
12	0,36	-4,47	-144,5	1.235,5	0,0	-5,3	1.230,3	-131,1	-67,3	1.031,9	25,2
13	1,09	-4,47	-192,3	1.187,7	0,0	-22,6	1.165,0	-145,7	-54,6	964,7	30,1
14	1,21	0,00	-240,2	1.139,8	0,0	-52,0	1.087,8	-165,5	-50,2	872,1	36,8
15	1,21	0,00	-288,1	1.091,9	0,0	-65,7	1.026,2	-142,0	-52,4	831,9	39,7
16	1,21	0,00	-336,0	1.044,0	0,0	-69,8	974,2	-128,0	-48,6	797,6	42,2
17	1,21	0,00	-329,8	1.050,2	0,0	-64,5	985,7	-147,6	-47,5	790,5	42,7
18	1,21	0,00	-281,9	1.098,1	0,0	-49,0	1.049,1	-177,8	-44,2	827,2	40,1
19	1,09	4,47	-234,0	1.146,0	0,0	-21,0	1.125,0	-162,3	-51,2	911,4	34,0
20	0,36	4,47	-186,2	1.193,8	0,0	-4,6	1.189,3	-148,7	-65,4	975,1	29,3
21	0,24	0,00	-138,3	1.241,7	0,0	-12,5	1.229,2	-99,8	-81,1	1.048,4	24,0
22	0,24	0,00	-107,6	1.272,4	0,0	-4,4	1.268,1	-129,6	-75,3	1.063,2	23,0
23	0,24	0,00	-76,8	1.303,2	-36,4	-2,2	1.264,5	-153,8	-61,2	1.049,5	23,9
24	0,24	0,00	-46,1	1.333,9	-97,9	-11,5	1.224,5	-172,5	-49,9	1.002,2	27,4
25	0,27	-3,28	-15,4	1.364,6	-159,4	-17,7	1.187,5	-166,4	-46,0	975,1	29,3



Grupo 5 - G5

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 10,00°

Ângulo no Final do Cabo: -10,00°

Variação Angular Vertical: 67,13°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 85,66 m

Comprimento Total do Cabo: 85,82 m

Alongamento do Cabo: 26,05 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 11,48 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
8	0,31	5,33	-12,3	1.367,7	-179,1	-1,6	1.187,0	-154,9	-65,8	966,3	30,0
9	0,24	0,00	-37,0	1.343,0	-129,8	-2,8	1.210,4	-135,6	-69,8	1.005,0	27,2
10	0,24	0,00	-61,7	1.318,3	-80,4	-6,9	1.231,0	-106,3	-81,3	1.043,4	24,4
11	0,24	0,00	-86,3	1.293,7	-31,1	-10,6	1.251,9	-85,6	-85,1	1.081,2	21,7
12	0,99	-7,92	-141,3	1.238,7	0,0	-5,3	1.233,4	-131,1	-67,3	1.035,1	25,0
13	1,21	0,00	-196,3	1.183,7	0,0	-22,6	1.161,0	-145,7	-54,6	960,7	30,4
14	1,21	0,00	-251,3	1.128,7	0,0	-52,0	1.076,6	-165,5	-50,2	861,0	37,6

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 5 - G5

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 10,00°

Ângulo no Final do Cabo: -10,00°

Variação Angular Vertical: 67,13°

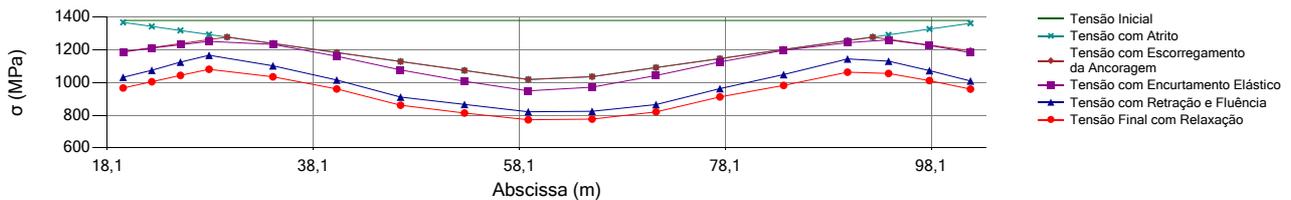
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 85,66 m

Comprimento Total do Cabo: 85,82 m

Alongamento do Cabo: 26,05 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 11,48 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
15	1,21	0,00	-306,3	1.073,7	0,0	-65,7	1.007,9	-142,0	-52,4	813,6	41,0
16	1,21	0,00	-361,3	1.018,7	0,0	-69,8	948,8	-128,0	-48,6	772,2	44,0
17	1,21	0,00	-343,6	1.036,4	0,0	-64,5	971,9	-147,6	-47,5	776,7	43,7
18	1,21	0,00	-288,6	1.091,4	0,0	-49,0	1.042,4	-177,8	-44,2	820,5	40,5
19	1,21	0,00	-233,6	1.146,4	0,0	-21,0	1.125,4	-162,3	-51,2	911,9	33,9
20	0,99	7,92	-178,6	1.201,4	0,0	-4,6	1.196,9	-148,7	-65,4	982,7	28,8
21	0,24	0,00	-123,6	1.256,4	0,0	-12,5	1.243,9	-99,8	-81,1	1.063,1	23,0
22	0,24	0,00	-88,3	1.291,7	-27,2	-4,4	1.260,1	-129,6	-75,3	1.055,2	23,5
23	0,24	0,00	-53,0	1.327,0	-97,8	-2,2	1.227,0	-153,8	-61,2	1.012,0	26,7
24	0,27	-3,28	-17,7	1.362,3	-168,5	-11,5	1.182,4	-172,5	-49,9	960,1	30,4



Grupo 6 - G6

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 3,00°

Ângulo no Final do Cabo: -3,00°

Variação Angular Vertical: 5,99°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 55,80 m

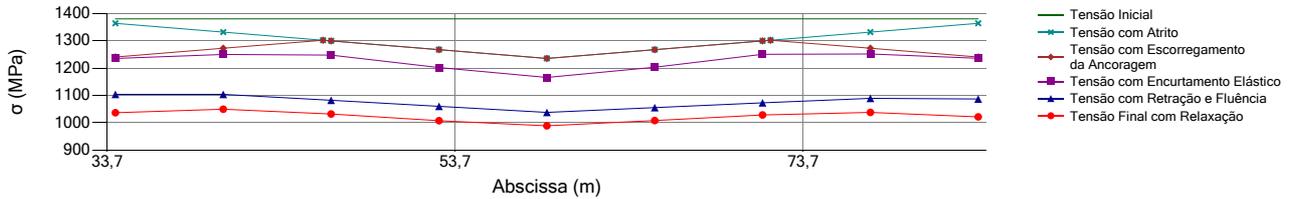
Comprimento Total do Cabo: 55,81 m

Alongamento do Cabo: 18,60 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 15,04 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
12	1,52	2,21	-16,0	1.364,0	-123,5	-5,3	1.235,2	-131,1	-67,3	1.036,8	24,9
13	1,36	0,65	-48,1	1.331,9	-59,4	-22,6	1.249,9	-145,7	-54,6	1.049,6	23,9
14	1,35	0,00	-80,2	1.299,8	0,0	-52,0	1.247,8	-165,5	-50,2	1.032,1	25,2
15	1,35	0,00	-112,3	1.267,7	0,0	-65,7	1.202,0	-142,0	-52,4	1.007,6	27,0
16	1,35	0,00	-144,4	1.235,6	0,0	-69,8	1.165,8	-128,0	-48,6	989,2	28,3
17	1,35	0,00	-112,3	1.267,7	0,0	-64,5	1.203,2	-147,6	-47,5	1.008,0	27,0
18	1,35	0,00	-80,2	1.299,8	0,0	-49,0	1.250,8	-177,8	-44,2	1.028,9	25,4
19	1,36	-0,65	-48,1	1.331,9	-59,4	-21,0	1.251,5	-162,3	-51,2	1.037,9	24,8
20	1,52	-2,21	-16,0	1.364,0	-123,5	-4,6	1.235,9	-148,7	-65,4	1.021,7	26,0

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções



Grupo 7 - G7

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 1,94°

Ângulo no Final do Cabo: -1,94°

Variação Angular Vertical: 3,88°

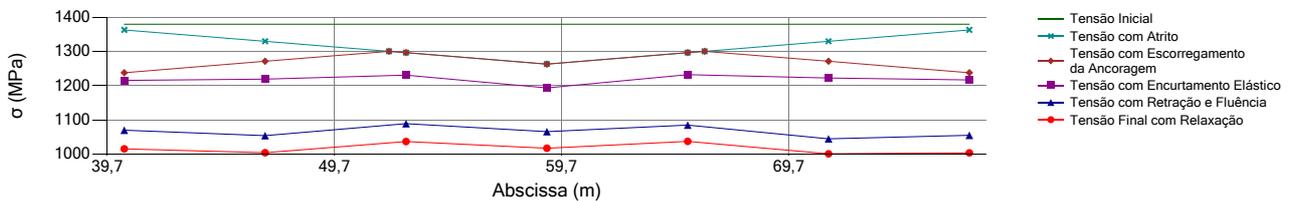
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 43,40 m

Comprimento Total do Cabo: 43,40 m

Alongamento do Cabo: 14,62 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 14,75 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσatr. (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσesc. (MPa)	Δσenc. (MPa)	σinst. (MPa)	Δσcs (MPa)	Δσr (MPa)	σfim (MPa)	Δσi (%)
13	1,42	1,30	-16,7	1.363,3	-125,3	-22,6	1.215,4	-145,7	-54,6	1.015,1	26,4
14	1,35	0,03	-50,0	1.330,0	-58,6	-52,0	1.219,4	-165,5	-50,2	1.003,7	27,3
15	1,35	0,00	-83,3	1.296,7	0,0	-65,7	1.231,0	-142,0	-52,4	1.036,6	24,9
16	1,35	0,00	-116,7	1.263,3	0,0	-69,8	1.193,5	-128,0	-48,6	1.016,9	26,3
17	1,35	0,00	-83,3	1.296,7	0,0	-64,5	1.232,2	-147,6	-47,5	1.037,0	24,9
18	1,35	-0,03	-50,0	1.330,0	-58,6	-49,0	1.222,4	-177,8	-44,2	1.000,5	27,5
19	1,42	-1,30	-16,7	1.363,3	-125,3	-21,0	1.217,1	-162,3	-51,2	1.003,5	27,3



Grupo 8 - G8

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: -2,10°

Ângulo no Final do Cabo: 2,10°

Variação Angular Vertical: 4,20°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 31,00 m

Comprimento Total do Cabo: 31,00 m

Alongamento do Cabo: 10,51 cm / extremidade com ancoragem ativa

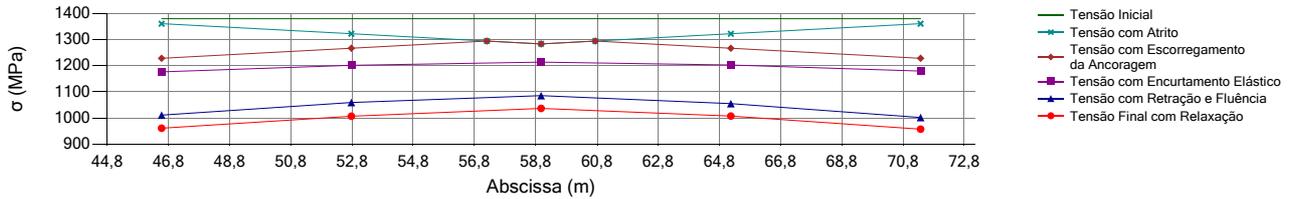
Comprimento de Ancoragem: 13,73 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσatr. (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσesc. (MPa)	Δσenc. (MPa)	σinst. (MPa)	Δσcs (MPa)	Δσr (MPa)	σfim (MPa)	Δσi (%)
14	1,32	-1,02	-19,2	1.360,8	-132,0	-52,0	1.176,8	-165,5	-50,2	961,1	30,4
15	1,35	0,00	-57,7	1.322,3	-55,0	-65,7	1.201,6	-142,0	-52,4	1.007,2	27,0
16	1,35	0,00	-96,2	1.283,8	0,0	-69,8	1.214,0	-128,0	-48,6	1.037,3	24,8
17	1,35	0,00	-57,7	1.322,3	-55,0	-64,5	1.202,8	-147,6	-47,5	1.007,6	27,0
18	1,32	1,02	-19,2	1.360,8	-132,0	-49,0	1.179,8	-177,8	-44,2	957,9	30,6

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções



Grupo 9 - G9

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 8,35°

Ângulo no Final do Cabo: -10,01°

Variação Angular Vertical: 18,36°

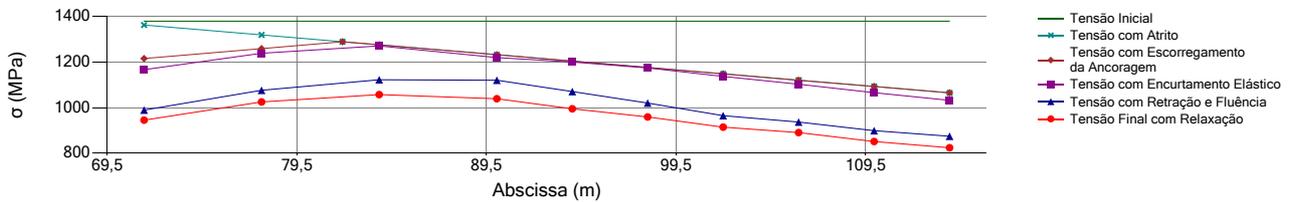
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 47,91 m

Comprimento Total do Cabo: 47,95 m

Alongamento do Cabo: 29,59 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 12,92 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσatr. (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσesc. (MPa)	Δσenc. (MPa)	σinst. (MPa)	Δσcs (MPa)	Δσr (MPa)	σfim (MPa)	Δσi (%)
18	0,22	4,62	-17,2	1.362,8	-146,8	-49,0	1.167,0	-177,8	-44,2	945,1	31,5
19	0,10	0,00	-60,7	1.319,3	-59,8	-21,0	1.238,5	-162,3	-51,2	1.024,9	25,7
20	0,10	0,00	-104,2	1.275,8	0,0	-4,6	1.271,3	-148,7	-65,4	1.057,1	23,4
21	0,10	0,00	-147,6	1.232,4	0,0	-12,5	1.219,9	-99,8	-81,1	1.039,0	24,7
22	0,10	0,00	-175,6	1.204,4	0,0	-4,4	1.200,1	-129,6	-75,3	995,2	27,9
23	0,10	0,00	-203,5	1.176,5	0,0	-2,2	1.174,3	-153,8	-61,2	959,3	30,5
24	0,10	0,00	-231,4	1.148,6	0,0	-11,5	1.137,1	-172,5	-49,9	914,8	33,7
25	0,10	0,00	-259,3	1.120,7	0,0	-17,7	1.103,0	-166,4	-46,0	890,5	35,5
26	0,10	0,00	-287,2	1.092,8	0,0	-26,9	1.065,8	-166,9	-47,4	851,6	38,3
27	0,10	-1,25	-315,1	1.064,9	0,0	-33,0	1.031,8	-157,5	-50,2	824,2	40,3



Grupo 10 - G10

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 9,97°

Ângulo no Final do Cabo: 6,71°

Variação Angular Vertical: 36,62°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 55,50 m

Comprimento Total do Cabo: 55,59 m

Alongamento do Cabo: 17,80 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 11,73 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσatr. (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσesc. (MPa)	Δσenc. (MPa)	σinst. (MPa)	Δσcs (MPa)	Δσr (MPa)	σfim (MPa)	Δσi (%)
19	0,14	3,21	-26,4	1.353,6	-146,8	-21,0	1.185,9	-162,3	-51,2	972,3	29,5
20	0,10	0,00	-79,1	1.300,9	-41,3	-4,6	1.255,0	-148,7	-65,4	1.040,9	24,6
21	0,10	0,00	-131,9	1.248,1	0,0	-12,5	1.235,6	-99,8	-81,1	1.054,8	23,6
22	0,19	-2,58	-165,7	1.214,3	0,0	-4,4	1.209,9	-129,6	-75,3	1.005,0	27,2
23	0,46	-5,16	-199,6	1.180,4	0,0	-2,2	1.178,2	-153,8	-61,2	963,2	30,2
24	0,86	-4,84	-233,5	1.146,5	0,0	-11,5	1.135,1	-172,5	-49,9	912,7	33,9
25	1,08	-1,62	-204,9	1.175,1	0,0	-17,7	1.157,4	-166,4	-46,0	945,0	31,5
26	1,09	1,18	-171,0	1.209,0	0,0	-26,9	1.182,1	-166,9	-47,4	967,8	29,9

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 10 - G10

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 9,97°

Ângulo no Final do Cabo: 6,71°

Variação Angular Vertical: 36,62°

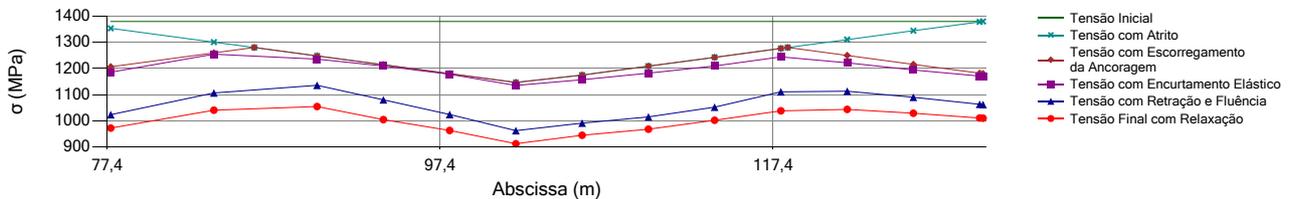
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 55,50 m

Comprimento Total do Cabo: 55,59 m

Alongamento do Cabo: 17,80 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 11,73 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
27	0,93	3,53	-137,1	1.242,9	0,0	-33,0	1.209,8	-157,5	-50,2	1.002,2	27,4
28	0,74	1,77	-103,3	1.276,7	0,0	-32,0	1.244,7	-133,8	-72,5	1.038,5	24,7
29	0,68	0,00	-69,4	1.310,6	-60,7	-27,8	1.222,1	-108,5	-69,8	1.043,8	24,4
30	0,57	3,28	-35,6	1.344,4	-128,4	-21,8	1.194,2	-104,0	-61,3	1.028,8	25,4
31	0,22	6,55	-1,7	1.378,3	-196,1	-11,2	1.171,0	-108,0	-52,0	1.010,9	26,7
32	0,20	6,71	0,0	1.380,0	-199,5	-11,1	1.169,4	-107,5	-51,7	1.010,2	26,8



Grupo 11 - G11

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 9,97°

Ângulo no Final do Cabo: 2,81°

Variação Angular Vertical: 42,80°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 50,85 m

Comprimento Total do Cabo: 50,95 m

Alongamento do Cabo: 16,12 cm / extremidade com ancoragem ativa

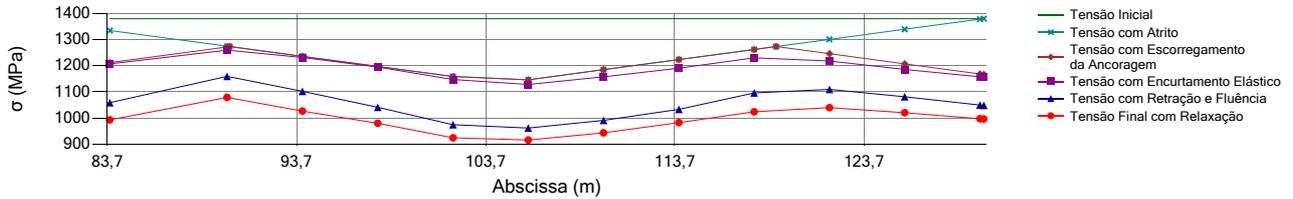
Comprimento de Ancoragem: 10,98 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
20	0,10	0,00	-45,1	1.334,9	-122,9	-4,6	1.207,5	-148,7	-65,4	993,3	28,0
21	0,10	0,00	-105,3	1.274,7	-2,6	-12,5	1.259,7	-99,8	-81,1	1.078,8	21,8
22	0,37	-7,71	-143,9	1.236,1	0,0	-4,4	1.231,7	-129,6	-75,3	1.026,9	25,6
23	1,01	-5,80	-182,5	1.197,5	0,0	-2,2	1.195,3	-153,8	-61,2	980,3	29,0
24	1,11	0,00	-221,1	1.158,9	0,0	-11,5	1.147,4	-172,5	-49,9	925,1	33,0
25	1,11	0,00	-233,6	1.146,4	0,0	-17,7	1.128,7	-166,4	-46,0	916,2	33,6
26	1,09	1,18	-195,0	1.185,0	0,0	-26,9	1.158,1	-166,9	-47,4	943,8	31,6
27	0,93	3,53	-156,4	1.223,6	0,0	-33,0	1.190,6	-157,5	-50,2	982,9	28,8
28	0,74	1,77	-117,8	1.262,2	0,0	-32,0	1.230,2	-133,8	-72,5	1.024,0	25,8
29	0,68	0,00	-79,2	1.300,8	-54,7	-27,8	1.218,3	-108,5	-69,8	1.040,0	24,6
30	0,63	1,37	-40,6	1.339,4	-132,0	-21,8	1.185,6	-104,0	-61,3	1.020,3	26,1
31	0,49	2,74	-1,9	1.378,1	-209,2	-11,2	1.157,7	-108,0	-52,0	997,6	27,7
32	0,48	2,81	0,0	1.380,0	-213,1	-11,1	1.155,8	-107,5	-51,7	996,6	27,8

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções



Grupo 12 - G12

Área de Aço: 11,30 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.380,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 0,00°

Ângulo no Final do Cabo: 0,00°

Variação Angular Vertical: 5,05°

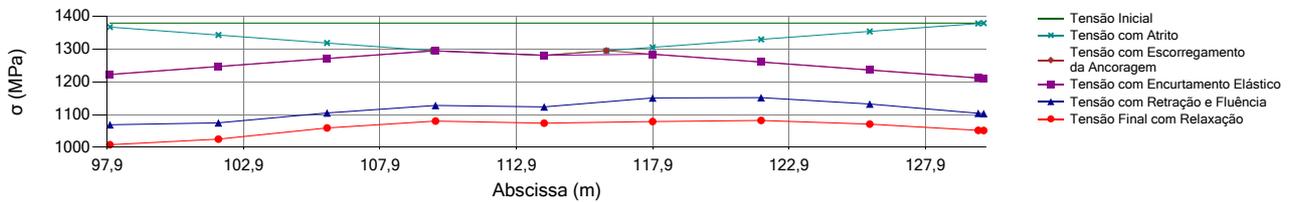
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 34,03 m

Comprimento Total do Cabo: 34,04 m

Alongamento do Cabo: 11,54 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 13,84 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσatr. (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσesc. (MPa)	Δσenc. (MPa)	σinst. (MPa)	Δσcs (MPa)	Δσr (MPa)	σfim (MPa)	Δσi (%)
23	1,50	0,28	-12,2	1.367,8	-144,8	0,0	1.223,0	-153,8	-61,2	1.008,0	27,0
24	1,46	0,84	-36,5	1.343,5	-96,2	0,0	1.247,4	-172,5	-49,9	1.025,0	25,7
25	1,38	1,40	-60,8	1.319,2	-47,5	0,0	1.271,7	-166,4	-46,0	1.059,3	23,2
26	1,26	1,96	-85,1	1.294,9	0,0	0,0	1.294,9	-166,9	-47,4	1.080,6	21,7
27	1,11	2,52	-98,5	1.281,5	0,0	0,0	1.281,5	-157,5	-50,2	1.073,8	22,2
28	0,95	1,90	-74,2	1.305,8	-20,7	0,0	1.285,1	-133,8	-72,5	1.078,8	21,8
29	0,84	1,28	-49,9	1.330,1	-69,4	0,0	1.260,7	-108,5	-69,8	1.082,4	21,6
30	0,77	0,65	-25,6	1.354,4	-118,0	0,0	1.236,4	-104,0	-61,3	1.071,1	22,4
31	0,75	0,03	-1,2	1.378,8	-166,7	0,0	1.212,1	-108,0	-52,0	1.052,0	23,8
32	0,75	0,00	0,0	1.380,0	-169,1	0,0	1.210,9	-107,5	-51,7	1.051,7	23,8



Esforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
0	-8.033,65	0,00	-88,15	0,00	0,00
1 esq.	-8.043,37	-0,77	-88,51	0,00	0,00
1 dir.	-8.043,37	-0,77	-88,51	59,55	0,00
2	-8.177,00	-11,75	-28,14	59,55	165,55
3	-8.313,19	-41,39	95,45	59,55	331,11
4	-8.456,34	-57,59	268,77	59,55	496,66
5	-8.620,53	-58,23	562,91	59,55	662,22
6	-8.643,29	-17,21	1.158,01	59,55	827,77
7	-11.211,43	213,89	2.984,81	59,55	993,33
8	-13.805,61	191,15	5.634,15	59,55	1.158,88
9	-13.866,02	-18,92	7.527,83	59,55	1.324,44
10	-11.313,18	0,00	10.627,43	59,55	1.489,99
11 esq.	-11.408,41	0,00	12.229,58	59,55	1.655,55
11 dir.	-11.408,41	0,00	12.229,58	14,03	1.655,55
12	-13.957,38	-493,04	6.177,40	14,03	1.742,53
13	-13.562,86	-111,05	-1.832,93	14,03	1.829,51

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Esforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
14	-13.126,34	-45,64	-6.610,84	14,03	1.916,49
15	-12.811,02	0,00	-7.363,29	14,03	2.003,47
16	-12.421,70	0,00	-7.453,23	14,03	2.090,45
17	-12.646,78	0,00	-7.284,83	14,03	2.177,43
18	-15.611,22	258,18	-5.060,22	14,03	2.264,42
19	-16.131,25	253,80	287,13	14,03	2.351,40
20	-16.587,94	474,37	8.784,73	14,03	2.438,38
21 esq.	-13.985,67	0,00	15.189,13	14,03	2.525,36
21 dir.	-13.985,67	0,00	15.189,13	-63,45	2.525,36
22	-13.916,08	-496,59	12.253,18	-63,45	2.272,82
23	-16.388,59	-498,57	6.234,56	-63,45	2.020,29
24	-15.973,09	-327,84	2.735,57	-63,45	1.767,75
25	-13.210,77	-157,07	-744,10	-63,45	1.515,22
26	-10.621,04	209,08	-2.712,42	-63,45	1.262,68
27	-10.639,20	410,99	-2.240,74	-63,45	1.010,14
28	-8.493,35	268,93	-2.405,50	-63,45	757,61
29	-8.363,84	63,56	-2.022,76	-63,45	505,07
30	-8.167,28	250,59	-1.534,17	-63,45	252,54
31 esq.	-7.981,86	428,20	-241,66	-63,45	0,00
31 dir.	-7.981,86	428,20	-241,66	0,00	0,00
32	-7.970,29	436,68	-155,39	0,00	0,00

Reações Hiperestáticas Iniciais

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 1: 59,55 KN

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 2: -45,52 KN

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 3: -77,48 KN

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 4: 63,45 KN

Esforços Finais de Protensão

Seção	Nfp (KN)	Vfp (KN)	Mfp (KNm)	Vhfp (KN)	Mhfp (KNm)
0	-6.938,70	0,00	-74,64	0,00	0,00
1 esq.	-6.945,82	-0,66	-74,97	0,00	0,00
1 dir.	-6.945,82	-0,66	-74,97	47,34	0,00
2	-7.052,43	-10,08	-23,02	47,34	131,62
3	-7.077,71	-35,16	82,41	47,34	263,23
4	-7.060,06	-48,04	225,30	47,34	394,85
5	-7.212,81	-48,70	471,35	47,34	526,47
6	-7.288,46	-14,34	981,26	47,34	658,08
7	-9.340,23	176,82	2.489,43	47,34	789,70
8	-11.313,94	155,32	4.622,18	47,34	921,32
9	-11.544,46	-15,67	6.283,52	47,34	1.052,93
10	-9.616,81	0,00	9.034,54	47,34	1.184,55
11 esq.	-9.864,57	0,00	10.574,58	47,34	1.316,17
11 dir.	-9.864,57	0,00	10.574,58	12,93	1.316,17
12	-11.722,11	-413,64	5.192,18	12,93	1.396,32
13	-11.300,79	-91,14	-1.527,52	12,93	1.476,48
14	-10.689,50	-37,27	-5.392,74	12,93	1.556,64
15	-10.615,09	0,00	-6.113,81	12,93	1.636,79
16	-10.425,86	0,00	-6.269,69	12,93	1.716,95
17	-10.441,08	0,00	-6.029,78	12,93	1.797,11
18	-12.603,81	209,17	-4.090,63	12,93	1.877,26
19	-13.237,52	205,57	245,83	12,93	1.957,42
20	-13.690,80	388,65	7.258,92	12,93	2.037,58
21 esq.	-11.941,96	0,00	12.969,66	12,93	2.117,73
21 dir.	-11.941,96	0,00	12.969,66	-53,21	2.117,73
22	-11.605,46	-413,62	10.216,54	-53,21	1.905,96
23	-13.477,56	-408,21	5.126,25	-53,21	1.694,19

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Esforços Finais de Protensão

Seção	Nfp (KN)	Vfp (KN)	Mfp (KNm)	Vhfp (KN)	Mhfp (KNm)
24	-12.960,68	-264,09	2.204,93	-53,21	1.482,41
25	-10.811,53	-127,80	-641,79	-53,21	1.270,64
26	-8.684,49	172,56	-2.270,91	-53,21	1.058,87
27	-8.764,63	342,73	-1.901,21	-53,21	847,09
28	-7.095,67	224,70	-2.012,12	-53,21	635,32
29	-7.154,87	54,57	-1.731,80	-53,21	423,55
30	-7.047,05	215,99	-1.325,33	-53,21	211,77
31 esq.	-6.899,54	369,49	-212,19	-53,21	0,00
31 dir.	-6.899,54	369,49	-212,19	0,00	0,00
32	-6.893,83	377,03	-137,85	0,00	0,00

Reações Hiperestáticas Finais

Reação Hiperestática Final no Apoio 1: 47,34 KN
 Reação Hiperestática Final no Apoio 2: -34,42 KN
 Reação Hiperestática Final no Apoio 3: -66,14 KN
 Reação Hiperestática Final no Apoio 4: 53,21 KN

Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1
 Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1
 Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2
 Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx
 Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin
 Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
0	Superior	-4,41	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-4,85
0	Inferior	-5,07	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-5,57
1	Superior	-4,41	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-4,85
1	Inferior	-5,07	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-5,58
2	Superior	-5,36	-4,61	-4,66	-4,94	-4,41	-5,88
2	Inferior	-4,03	-3,49	-3,44	-3,14	-3,70	-4,45
3	Superior	-6,25	-5,14	-5,15	-5,63	-4,66	-6,96
3	Inferior	-4,98	-4,43	-4,43	-3,91	-4,94	-5,39
4	Superior	-6,80	-5,15	-5,03	-5,64	-4,35	-7,76
4	Inferior	-7,63	-6,93	-7,06	-6,40	-7,79	-8,08
5	Superior	-5,90	-4,14	-3,88	-4,47	-3,09	-6,93
5	Inferior	-8,15	-7,67	-7,96	-7,32	-8,79	-8,49
6	Superior	-4,96	-3,16	-2,74	-3,26	-1,94	-6,06
6	Inferior	-8,16	-7,98	-8,42	-7,87	-9,29	-8,34
7	Superior	-7,80	-5,21	-4,66	-5,07	-3,87	-9,31
7	Inferior	-7,81	-7,88	-8,47	-8,03	-9,32	-7,81
8	Superior	-10,68	-7,21	-6,55	-6,85	-5,80	-12,58
8	Inferior	-6,89	-7,29	-7,98	-7,67	-8,79	-6,70
9	Superior	-9,02	-6,05	-5,36	-5,56	-4,69	-10,77
9	Inferior	-5,77	-6,36	-7,08	-6,88	-7,79	-5,45
10	Superior	-6,76	-4,47	-3,81	-3,94	-3,22	-8,25
10	Inferior	-2,70	-3,65	-4,34	-4,20	-4,96	-2,12
11	Superior	-4,85	-3,04	-2,40	-2,51	-1,86	-6,12
11	Inferior	-3,00	-3,80	-4,47	-4,37	-5,05	-2,46
12	Superior	-8,65	-6,45	-6,03	-6,16	-5,62	-9,99
12	Inferior	-3,56	-3,85	-4,29	-4,16	-4,73	-3,42
13	Superior	-7,53	-6,18	-6,12	-6,34	-5,87	-8,30
13	Inferior	-7,88	-6,66	-6,72	-6,50	-6,99	-8,65
14	Superior	-6,27	-6,08	-6,49	-6,91	-6,35	-6,37
14	Inferior	-11,53	-8,35	-7,91	-7,46	-8,06	-13,25

Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin

Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
15	Superior	-8,38	-8,52	-9,31	-10,07	-9,09	-8,26
15	Inferior	-9,81	-6,44	-5,60	-4,79	-5,84	-11,81
16	Superior	-9,15	-9,35	-10,26	-11,18	-9,96	-8,97
16	Inferior	-8,81	-5,61	-4,64	-3,66	-4,96	-10,87
17	Superior	-7,79	-7,90	-8,60	-9,41	-8,25	-7,70
17	Inferior	-10,21	-6,85	-6,11	-5,24	-6,48	-12,15
18	Superior	-9,44	-8,40	-8,65	-9,17	-8,29	-10,01
18	Inferior	-11,60	-8,53	-8,27	-7,71	-8,65	-13,15
19	Superior	-10,44	-8,24	-8,00	-8,21	-7,61	-11,70
19	Inferior	-7,79	-6,74	-7,00	-6,78	-7,41	-8,34
20	Superior	-10,99	-7,96	-7,36	-7,43	-6,87	-12,74
20	Inferior	-3,48	-4,05	-4,68	-4,61	-5,20	-3,14
21	Superior	-6,57	-4,20	-3,40	-3,44	-2,81	-8,18
21	Inferior	-3,01	-4,06	-4,90	-4,86	-5,53	-2,31
22	Superior	-9,28	-6,31	-5,57	-5,62	-4,99	-11,08
22	Inferior	-2,30	-3,44	-4,22	-4,16	-4,83	-1,62
23	Superior	-10,40	-7,20	-6,54	-6,66	-5,95	-12,22
23	Inferior	-7,10	-7,27	-7,97	-7,84	-8,60	-6,98
24	Superior	-10,97	-7,82	-7,33	-7,58	-6,72	-12,67
24	Inferior	-9,45	-8,82	-9,34	-9,07	-9,99	-9,75
25	Superior	-7,28	-5,35	-5,12	-5,57	-4,49	-8,34
25	Inferior	-11,25	-9,86	-10,10	-9,61	-10,77	-12,02
26	Superior	-4,31	-3,38	-3,44	-4,11	-2,80	-4,78
26	Inferior	-11,95	-9,92	-9,85	-9,14	-10,54	-13,10
27	Superior	-7,73	-6,69	-7,03	-7,87	-6,41	-8,25
27	Inferior	-9,58	-7,55	-7,18	-6,28	-7,85	-10,80
28	Superior	-6,74	-6,41	-6,96	-7,86	-6,41	-6,94
28	Inferior	-7,75	-5,64	-5,05	-4,08	-5,64	-9,04
29	Superior	-6,01	-5,89	-6,45	-7,21	-6,06	-6,06
29	Inferior	-5,31	-3,74	-3,15	-2,33	-3,55	-6,42
30	Superior	-4,27	-4,21	-4,59	-5,05	-4,39	-4,30
30	Inferior	-5,17	-3,90	-3,50	-3,01	-3,71	-6,11
31	Superior	-3,82	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29	-4,20
31	Inferior	-5,63	-4,88	-4,88	-4,88	-4,88	-6,19
32	Superior	-4,12	-3,55	-3,55	-3,55	-3,55	-4,54
32	Inferior	-5,29	-4,59	-4,59	-4,59	-4,59	-5,82

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente (CQP)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CQP): -14,78 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP): -16,20 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): -17,25 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): 3,05 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CF): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,4*Mmáx

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CF): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,4*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,4*Mmin

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CF)	CP-2 (CF)	CP-3 (CF)	CP-4 (CF)	CP-5 (CF)	CP-6 (CF-ELU-CE)
0	Superior	-4,41	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-4,85
0	Inferior	-5,07	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-5,57
1	Superior	-4,41	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-4,85
1	Inferior	-5,07	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-5,58
2	Superior	-5,36	-4,61	-4,66	-5,03	-4,32	-5,88
2	Inferior	-4,03	-3,49	-3,44	-3,04	-3,79	-4,45
3	Superior	-6,25	-5,14	-5,15	-5,79	-4,50	-6,96
3	Inferior	-4,98	-4,43	-4,43	-3,73	-5,11	-5,39
4	Superior	-6,80	-5,15	-5,03	-5,84	-4,12	-7,76
4	Inferior	-7,63	-6,93	-7,06	-6,19	-8,04	-8,08
5	Superior	-5,90	-4,14	-3,88	-4,67	-2,83	-6,93
5	Inferior	-8,15	-7,67	-7,96	-7,11	-9,07	-8,49
6	Superior	-4,96	-3,16	-2,74	-3,43	-1,67	-6,06
6	Inferior	-8,16	-7,98	-8,42	-7,69	-9,58	-8,34
7	Superior	-7,80	-5,21	-4,66	-5,21	-3,61	-9,31
7	Inferior	-7,81	-7,88	-8,47	-7,89	-9,60	-7,81
8	Superior	-10,68	-7,21	-6,55	-6,95	-5,55	-12,58
8	Inferior	-6,89	-7,29	-7,98	-7,56	-9,05	-6,70
9	Superior	-9,02	-6,05	-5,36	-5,62	-4,47	-10,77
9	Inferior	-5,77	-6,36	-7,08	-6,81	-8,03	-5,45
10	Superior	-6,76	-4,47	-3,81	-3,99	-3,03	-8,25
10	Inferior	-2,70	-3,65	-4,34	-4,16	-5,17	-2,12
11	Superior	-4,85	-3,04	-2,40	-2,54	-1,67	-6,12
11	Inferior	-3,00	-3,80	-4,47	-4,33	-5,24	-2,46
12	Superior	-8,65	-6,45	-6,03	-6,20	-5,48	-9,99
12	Inferior	-3,56	-3,85	-4,29	-4,12	-4,88	-3,42
13	Superior	-7,53	-6,18	-6,12	-6,41	-5,79	-8,30
13	Inferior	-7,88	-6,66	-6,72	-6,42	-7,08	-8,65
14	Superior	-6,27	-6,08	-6,49	-7,06	-6,30	-6,37
14	Inferior	-11,53	-8,35	-7,91	-7,31	-8,11	-13,25
15	Superior	-8,38	-8,52	-9,31	-10,32	-9,02	-8,26
15	Inferior	-9,81	-6,44	-5,60	-4,52	-5,92	-11,81
16	Superior	-9,15	-9,35	-10,26	-11,49	-9,86	-8,97
16	Inferior	-8,81	-5,61	-4,64	-3,33	-5,07	-10,87
17	Superior	-7,79	-7,90	-8,60	-9,68	-8,14	-7,70
17	Inferior	-10,21	-6,85	-6,11	-4,95	-6,60	-12,15
18	Superior	-9,44	-8,40	-8,65	-9,35	-8,17	-10,01
18	Inferior	-11,60	-8,53	-8,27	-7,52	-8,78	-13,15
19	Superior	-10,44	-8,24	-8,00	-8,28	-7,47	-11,70
19	Inferior	-7,79	-6,74	-7,00	-6,70	-7,55	-8,34
20	Superior	-10,99	-7,96	-7,36	-7,45	-6,71	-12,74
20	Inferior	-3,48	-4,05	-4,68	-4,58	-5,37	-3,14
21	Superior	-6,57	-4,20	-3,40	-3,45	-2,61	-8,18
21	Inferior	-3,01	-4,06	-4,90	-4,85	-5,73	-2,31
22	Superior	-9,28	-6,31	-5,57	-5,64	-4,79	-11,08
22	Inferior	-2,30	-3,44	-4,22	-4,14	-5,03	-1,62
23	Superior	-10,40	-7,20	-6,54	-6,70	-5,75	-12,22
23	Inferior	-7,10	-7,27	-7,97	-7,80	-8,81	-6,98
24	Superior	-10,97	-7,82	-7,33	-7,67	-6,52	-12,67
24	Inferior	-9,45	-8,82	-9,34	-8,98	-10,20	-9,75

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CF): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,4*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,4*Mmin

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CF)	CP-2 (CF)	CP-3 (CF)	CP-4 (CF)	CP-5 (CF)	CP-6 (CF-ELU-CE)
25	Superior	-7,28	-5,35	-5,12	-5,73	-4,28	-8,34
25	Inferior	-11,25	-9,86	-10,10	-9,45	-11,00	-12,02
26	Superior	-4,31	-3,38	-3,44	-4,33	-2,58	-4,78
26	Inferior	-11,95	-9,92	-9,85	-8,90	-10,77	-13,10
27	Superior	-7,73	-6,69	-7,03	-8,15	-6,20	-8,25
27	Inferior	-9,58	-7,55	-7,18	-5,98	-8,07	-10,80
28	Superior	-6,74	-6,41	-6,96	-8,16	-6,23	-6,94
28	Inferior	-7,75	-5,64	-5,05	-3,75	-5,83	-9,04
29	Superior	-6,01	-5,89	-6,45	-7,46	-5,94	-6,06
29	Inferior	-5,31	-3,74	-3,15	-2,06	-3,69	-6,42
30	Superior	-4,27	-4,21	-4,59	-5,20	-4,33	-4,30
30	Inferior	-5,17	-3,90	-3,50	-2,85	-3,78	-6,11
31	Superior	-3,82	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29	-4,20
31	Inferior	-5,63	-4,88	-4,88	-4,88	-4,88	-6,19
32	Superior	-4,12	-3,55	-3,55	-3,55	-3,55	-4,54
32	Inferior	-5,29	-4,59	-4,59	-4,59	-4,59	-5,82

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Frequente (CF)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CF): -14,78 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF): -16,20 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): -17,25 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 2,54 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 2,70 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): 3,05 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx

Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmin

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
0	Superior	-4,41	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-4,85
0	Inferior	-5,07	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-5,57
1	Superior	-4,41	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-4,85
1	Inferior	-5,07	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-5,58
2	Superior	-5,36	-4,61	-4,66	-5,60	-3,82	-5,88
2	Inferior	-4,03	-3,49	-3,44	-2,44	-4,33	-4,45
3	Superior	-6,25	-5,14	-5,15	-6,77	-3,54	-6,96
3	Inferior	-4,98	-4,43	-4,43	-2,70	-6,14	-5,39
4	Superior	-6,80	-5,15	-5,03	-7,05	-2,75	-7,76
4	Inferior	-7,63	-6,93	-7,06	-4,89	-9,51	-8,08
5	Superior	-5,90	-4,14	-3,88	-5,86	-1,27	-6,93
5	Inferior	-8,15	-7,67	-7,96	-5,83	-10,75	-8,49

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1
 Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1
 Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2
 Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx
 Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmín
 Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
6	Superior	-4,96	-3,16	-2,74	-4,47	-0,05	-6,06
6	Inferior	-8,16	-7,98	-8,42	-6,58	-11,31	-8,34
7	Superior	-7,80	-5,21	-4,66	-6,03	-2,02	-9,31
7	Inferior	-7,81	-7,88	-8,47	-7,01	-11,29	-7,81
8	Superior	-10,68	-7,21	-6,55	-7,55	-4,04	-12,58
8	Inferior	-6,89	-7,29	-7,98	-6,93	-10,66	-6,70
9	Superior	-9,02	-6,05	-5,36	-6,01	-3,12	-10,77
9	Inferior	-5,77	-6,36	-7,08	-6,40	-9,45	-5,45
10	Superior	-6,76	-4,47	-3,81	-4,25	-1,85	-8,25
10	Inferior	-2,70	-3,65	-4,34	-3,88	-6,41	-2,12
11	Superior	-4,85	-3,04	-2,40	-2,75	-0,58	-6,12
11	Inferior	-3,00	-3,80	-4,47	-4,11	-6,40	-2,46
12	Superior	-8,65	-6,45	-6,03	-6,45	-4,65	-9,99
12	Inferior	-3,56	-3,85	-4,29	-3,85	-5,76	-3,42
13	Superior	-7,53	-6,18	-6,12	-6,83	-5,28	-8,30
13	Inferior	-7,88	-6,66	-6,72	-5,97	-7,62	-8,65
14	Superior	-6,27	-6,08	-6,49	-7,91	-6,02	-6,37
14	Inferior	-11,53	-8,35	-7,91	-6,40	-8,42	-13,25
15	Superior	-8,38	-8,52	-9,31	-11,84	-8,58	-8,26
15	Inferior	-9,81	-6,44	-5,60	-2,90	-6,38	-11,81
16	Superior	-9,15	-9,35	-10,26	-13,33	-9,26	-8,97
16	Inferior	-8,81	-5,61	-4,64	-1,37	-5,71	-10,87
17	Superior	-7,79	-7,90	-8,60	-11,32	-7,45	-7,70
17	Inferior	-10,21	-6,85	-6,11	-3,20	-7,34	-12,15
18	Superior	-9,44	-8,40	-8,65	-10,39	-7,45	-10,01
18	Inferior	-11,60	-8,53	-8,27	-6,41	-9,55	-13,15
19	Superior	-10,44	-8,24	-8,00	-8,69	-6,69	-11,70
19	Inferior	-7,79	-6,74	-7,00	-6,26	-8,39	-8,34
20	Superior	-10,99	-7,96	-7,36	-7,59	-5,72	-12,74
20	Inferior	-3,48	-4,05	-4,68	-4,44	-6,42	-3,14
21	Superior	-6,57	-4,20	-3,40	-3,52	-1,41	-8,18
21	Inferior	-3,01	-4,06	-4,90	-4,77	-6,99	-2,31
22	Superior	-9,28	-6,31	-5,57	-5,75	-3,63	-11,08
22	Inferior	-2,30	-3,44	-4,22	-4,02	-6,26	-1,62
23	Superior	-10,40	-7,20	-6,54	-6,94	-4,56	-12,22
23	Inferior	-7,10	-7,27	-7,97	-7,55	-10,07	-6,98
24	Superior	-10,97	-7,82	-7,33	-8,17	-5,29	-12,67
24	Inferior	-9,45	-8,82	-9,34	-8,44	-11,50	-9,75
25	Superior	-7,28	-5,35	-5,12	-6,63	-3,02	-8,34
25	Inferior	-11,25	-9,86	-10,10	-8,48	-12,34	-12,02
26	Superior	-4,31	-3,38	-3,44	-5,66	-1,30	-4,78
26	Inferior	-11,95	-9,92	-9,85	-7,48	-12,15	-13,10
27	Superior	-7,73	-6,69	-7,03	-9,83	-4,96	-8,25
27	Inferior	-9,58	-7,55	-7,18	-4,18	-9,40	-10,80
28	Superior	-6,74	-6,41	-6,96	-9,97	-5,14	-6,94
28	Inferior	-7,75	-5,64	-5,05	-1,81	-7,00	-9,04
29	Superior	-6,01	-5,89	-6,45	-8,98	-5,17	-6,06
29	Inferior	-5,31	-3,74	-3,15	-0,43	-4,51	-6,42
30	Superior	-4,27	-4,21	-4,59	-6,12	-3,93	-4,30
30	Inferior	-5,17	-3,90	-3,50	-1,88	-4,20	-6,11

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1
 Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1
 Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2
 Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx
 Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmín
 Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
31	Superior	-3,82	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29	-4,20
31	Inferior	-5,63	-4,88	-4,88	-4,88	-4,88	-6,19
32	Superior	-4,12	-3,55	-3,55	-3,55	-3,55	-4,54
32	Inferior	-5,29	-4,59	-4,59	-4,59	-4,59	-5,82

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Rara (CR)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CR): -14,78 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR): -16,20 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): -17,25 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 2,54 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 2,70 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): 3,05 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Especiais - CE (MPa)

Combinação Especial 1 (CE) : 1,0*Nip + 0,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 0,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 0,0*Mmín + 1,0*Mip + 0,0*Mfp + 1,0*Mhip + 0,0*Mhfp
 Combinação Especial 2 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 0,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 0,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 3 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 0,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 4 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 1,0*Mmáx + 0,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 5 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 1,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 6 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 0,5*Mmáx + 0,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 7 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 0,5*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp

Seção	Borda	CE-1 (CE)	CE-2 (CE)	CE-3 (CE)	CE-4 (CE)	CE-5 (CE)	CE-6 (CE)	CE-7 (CE)
0	Superior	-4,41	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81
0	Inferior	-5,07	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37
1	Superior	-4,41	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81	-3,81
1	Inferior	-5,07	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37	-4,37
2	Superior	-5,36	-4,61	-4,66	-5,60	-3,82	-5,13	-4,24
2	Inferior	-4,03	-3,49	-3,44	-2,44	-4,33	-2,94	-3,88
3	Superior	-6,25	-5,14	-5,15	-6,77	-3,54	-5,96	-4,34
3	Inferior	-4,98	-4,43	-4,43	-2,70	-6,14	-3,56	-5,29
4	Superior	-6,80	-5,15	-5,03	-7,05	-2,75	-6,04	-3,89
4	Inferior	-7,63	-6,93	-7,06	-4,89	-9,51	-5,97	-8,28
5	Superior	-5,90	-4,14	-3,88	-5,86	-1,27	-4,87	-2,57
5	Inferior	-8,15	-7,67	-7,96	-5,83	-10,75	-6,89	-9,35
6	Superior	-4,96	-3,16	-2,74	-4,47	-0,05	-3,61	-1,40
6	Inferior	-8,16	-7,98	-8,42	-6,58	-11,31	-7,50	-9,87
7	Superior	-7,80	-5,21	-4,66	-6,03	-2,02	-5,35	-3,34
7	Inferior	-7,81	-7,88	-8,47	-7,01	-11,29	-7,74	-9,88
8	Superior	-10,68	-7,21	-6,55	-7,55	-4,04	-7,05	-5,30
8	Inferior	-6,89	-7,29	-7,98	-6,93	-10,66	-7,46	-9,32
9	Superior	-9,02	-6,05	-5,36	-6,01	-3,12	-5,69	-4,24
9	Inferior	-5,77	-6,36	-7,08	-6,40	-9,45	-6,74	-8,27
10	Superior	-6,76	-4,47	-3,81	-4,25	-1,85	-4,03	-2,83
10	Inferior	-2,70	-3,65	-4,34	-3,88	-6,41	-4,11	-5,38
11	Superior	-4,85	-3,04	-2,40	-2,75	-0,58	-2,58	-1,49
11	Inferior	-3,00	-3,80	-4,47	-4,11	-6,40	-4,29	-5,44

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt

Tensões nas Seções - Combinação Especiais - CE (MPa)Combinação Especial 1 (CE) : $1,0 \cdot N_{ip} + 0,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot M_{g1} + 0,0 \cdot M_{g2} + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 1,0 \cdot M_{ip} + 0,0 \cdot M_{fp} + 1,0 \cdot M_{hip} + 0,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 2 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot M_{g1} + 0,0 \cdot M_{g2} + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 3 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot M_{g1} + 1,0 \cdot M_{g2} + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 4 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot M_{g1} + 1,0 \cdot M_{g2} + 1,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 5 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot M_{g1} + 1,0 \cdot M_{g2} + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 1,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 6 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot M_{g1} + 1,0 \cdot M_{g2} + 0,5 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 7 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot M_{g1} + 1,0 \cdot M_{g2} + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,5 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$

Seção	Borda	CE-1 (CE)	CE-2 (CE)	CE-3 (CE)	CE-4 (CE)	CE-5 (CE)	CE-6 (CE)	CE-7 (CE)
12	Superior	-8,65	-6,45	-6,03	-6,45	-4,65	-6,24	-5,34
12	Inferior	-3,56	-3,85	-4,29	-3,85	-5,76	-4,07	-5,02
13	Superior	-7,53	-6,18	-6,12	-6,83	-5,28	-6,48	-5,70
13	Inferior	-7,88	-6,66	-6,72	-5,97	-7,62	-6,35	-7,17
14	Superior	-6,27	-6,08	-6,49	-7,91	-6,02	-7,20	-6,25
14	Inferior	-11,53	-8,35	-7,91	-6,40	-8,42	-7,16	-8,17
15	Superior	-8,38	-8,52	-9,31	-11,84	-8,58	-10,57	-8,94
15	Inferior	-9,81	-6,44	-5,60	-2,90	-6,38	-4,25	-5,99
16	Superior	-9,15	-9,35	-10,26	-13,33	-9,26	-11,79	-9,76
16	Inferior	-8,81	-5,61	-4,64	-1,37	-5,71	-3,01	-5,18
17	Superior	-7,79	-7,90	-8,60	-11,32	-7,45	-9,96	-8,02
17	Inferior	-10,21	-6,85	-6,11	-3,20	-7,34	-4,66	-6,73
18	Superior	-9,44	-8,40	-8,65	-10,39	-7,45	-9,52	-8,05
18	Inferior	-11,60	-8,53	-8,27	-6,41	-9,55	-7,34	-8,91
19	Superior	-10,44	-8,24	-8,00	-8,69	-6,69	-8,35	-7,34
19	Inferior	-7,79	-6,74	-7,00	-6,26	-8,39	-6,63	-7,69
20	Superior	-10,99	-7,96	-7,36	-7,59	-5,72	-7,48	-6,54
20	Inferior	-3,48	-4,05	-4,68	-4,44	-6,42	-4,56	-5,55
21	Superior	-6,57	-4,20	-3,40	-3,52	-1,41	-3,46	-2,41
21	Inferior	-3,01	-4,06	-4,90	-4,77	-6,99	-4,83	-5,94
22	Superior	-9,28	-6,31	-5,57	-5,75	-3,63	-5,66	-4,60
22	Inferior	-2,30	-3,44	-4,22	-4,02	-6,26	-4,12	-5,24
23	Superior	-10,40	-7,20	-6,54	-6,94	-4,56	-6,74	-5,55
23	Inferior	-7,10	-7,27	-7,97	-7,55	-10,07	-7,76	-9,02
24	Superior	-10,97	-7,82	-7,33	-8,17	-5,29	-7,75	-6,31
24	Inferior	-9,45	-8,82	-9,34	-8,44	-11,50	-8,89	-10,42
25	Superior	-7,28	-5,35	-5,12	-6,63	-3,02	-5,88	-4,07
25	Inferior	-11,25	-9,86	-10,10	-8,48	-12,34	-9,29	-11,22
26	Superior	-4,31	-3,38	-3,44	-5,66	-1,30	-4,55	-2,37
26	Inferior	-11,95	-9,92	-9,85	-7,48	-12,15	-8,67	-11,00
27	Superior	-7,73	-6,69	-7,03	-9,83	-4,96	-8,43	-5,99
27	Inferior	-9,58	-7,55	-7,18	-4,18	-9,40	-5,68	-8,29
28	Superior	-6,74	-6,41	-6,96	-9,97	-5,14	-8,47	-6,05
28	Inferior	-7,75	-5,64	-5,05	-1,81	-7,00	-3,43	-6,03
29	Superior	-6,01	-5,89	-6,45	-8,98	-5,17	-7,71	-5,81
29	Inferior	-5,31	-3,74	-3,15	-0,43	-4,51	-1,79	-3,83
30	Superior	-4,27	-4,21	-4,59	-6,12	-3,93	-5,36	-4,26
30	Inferior	-5,17	-3,90	-3,50	-1,88	-4,20	-2,69	-3,85
31	Superior	-3,82	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29	-3,29
31	Inferior	-5,63	-4,88	-4,88	-4,88	-4,88	-4,88	-4,88
32	Superior	-4,12	-3,55	-3,55	-3,55	-3,55	-3,55	-3,55
32	Inferior	-5,29	-4,59	-4,59	-4,59	-4,59	-4,59	-4,59

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Especiais (CE)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-1 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-1 : 0,00 MPa

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Especiais (CE)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-2 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-2 : 0,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-3 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-3 : 0,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-4 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-4 : 3,40 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-5 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-5 : 3,40 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-6 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-6 : 3,40 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-7 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-7 : 3,40 MPa

Classificação Quanto ao Grau de Protensão (NBR-6118/2007)

Tipo de Concreto Estrutural	Exigências Relativas à Fissuração	Combinação de Ações em Serviço a Utilizar	Status da Verificação
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Combinação Frequente (CF)	Verificação não Necessária
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)	ELS-F	Combinação Frequente (CF)	Atendida
	ELS-D	Combinação Quase Permanente (CQP)	Atendida
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)	ELS-F	Combinação Rara (CR)	Atendida
	ELS-D	Combinação Frequente (CF)	Atendida

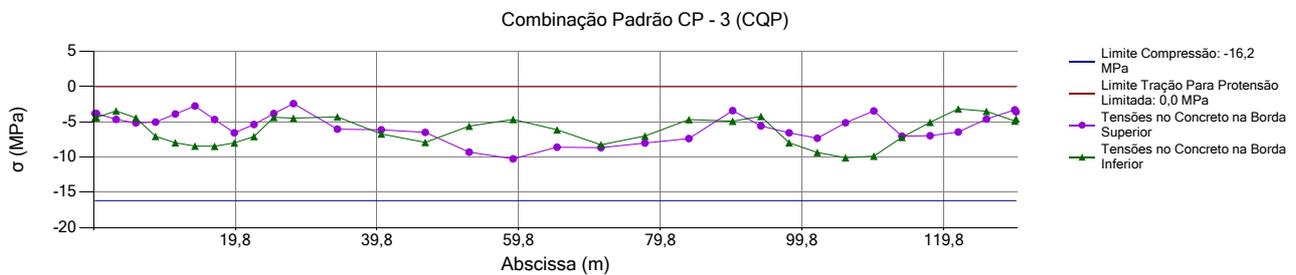
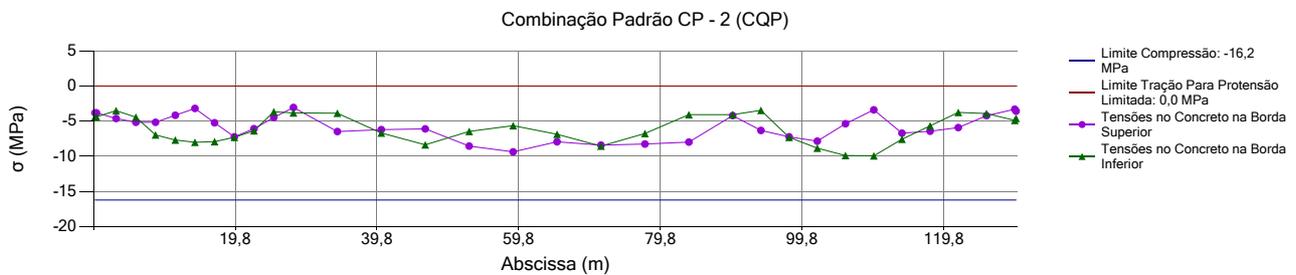
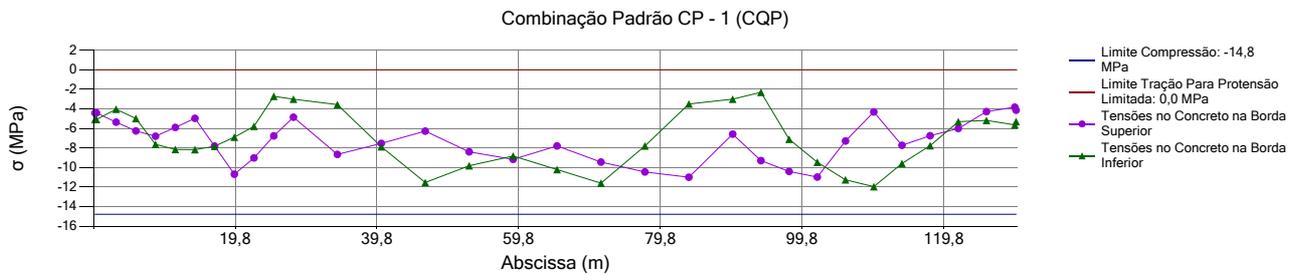
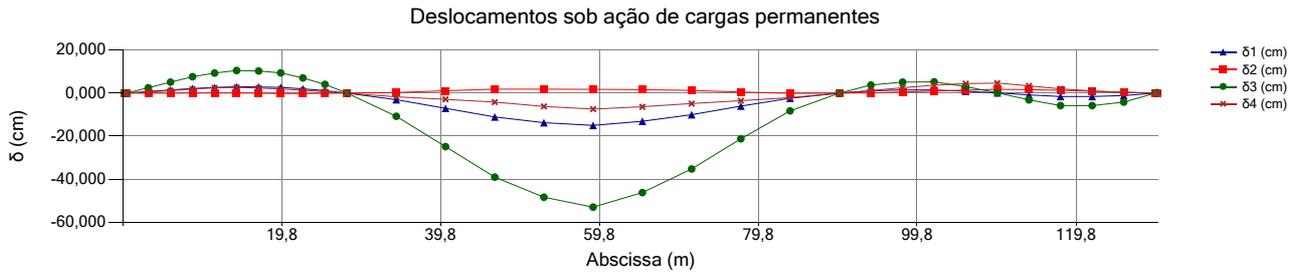
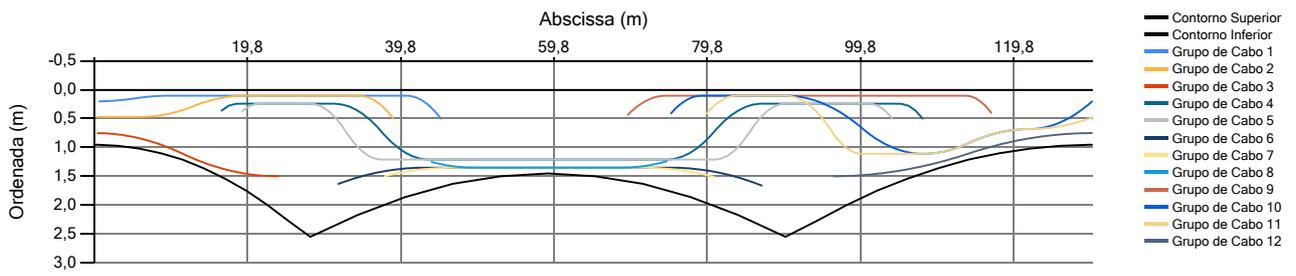
A estrutura atende aos requisitos prescritos pela NBR-6118/2007 para Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada) e Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)

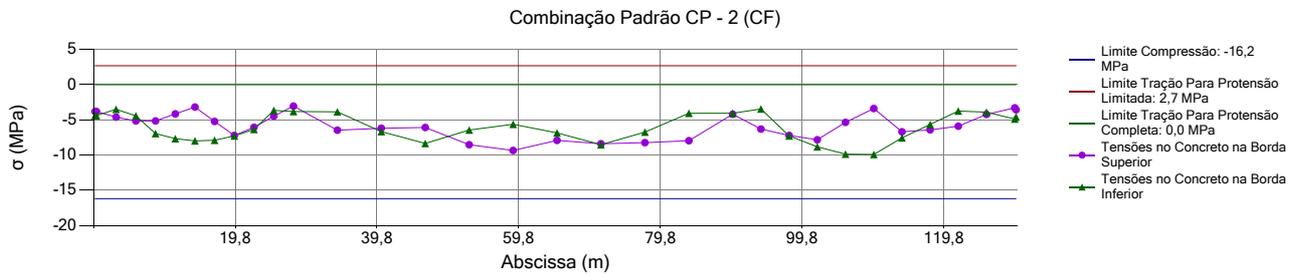
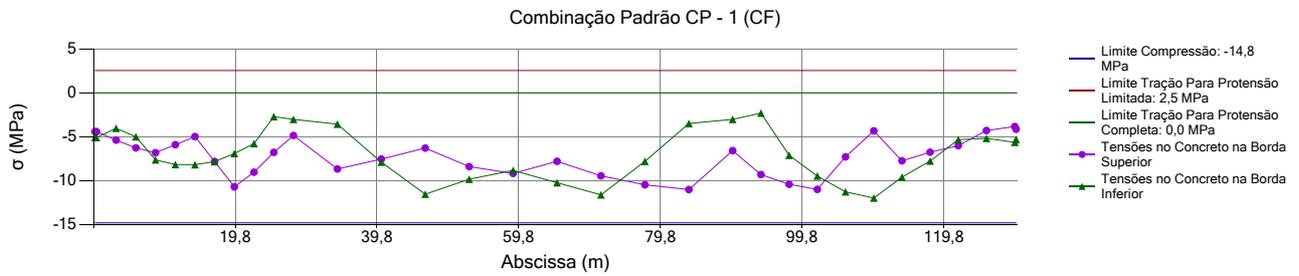
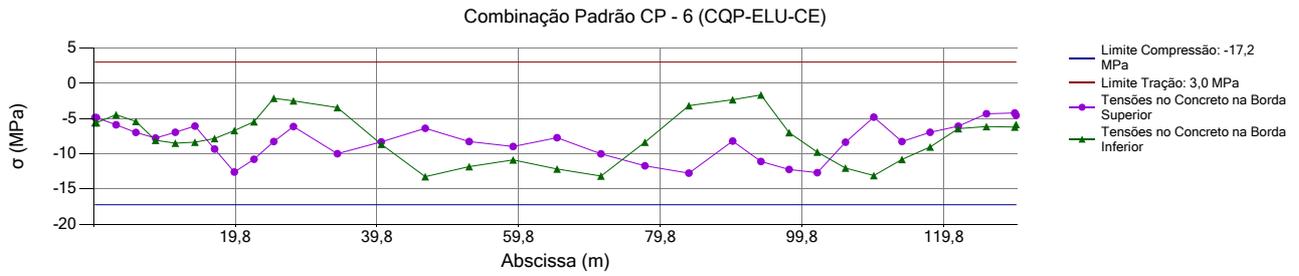
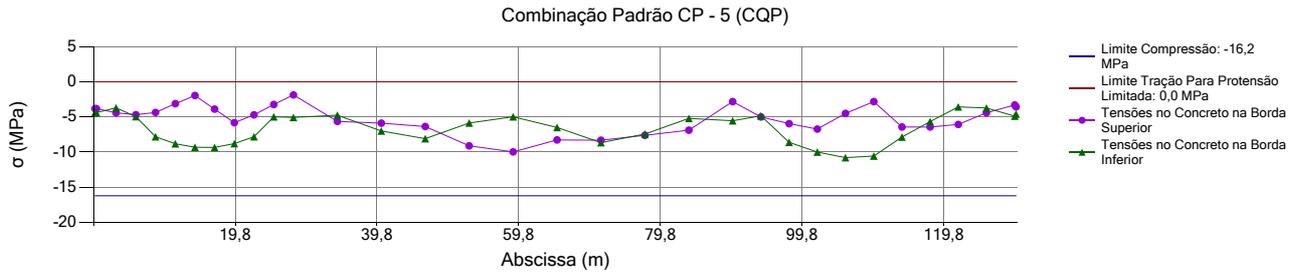
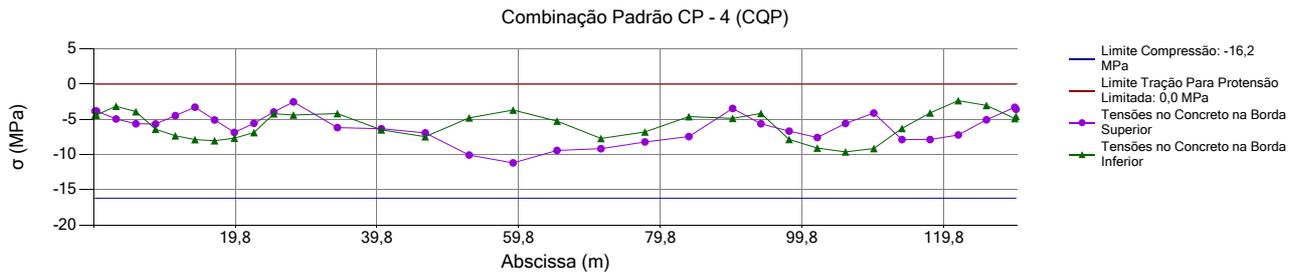
Deslocamentos sob Ação de Cargas Permanentes

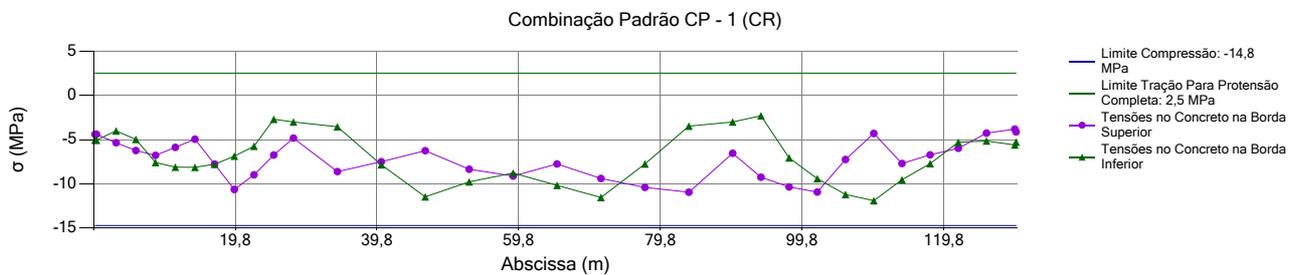
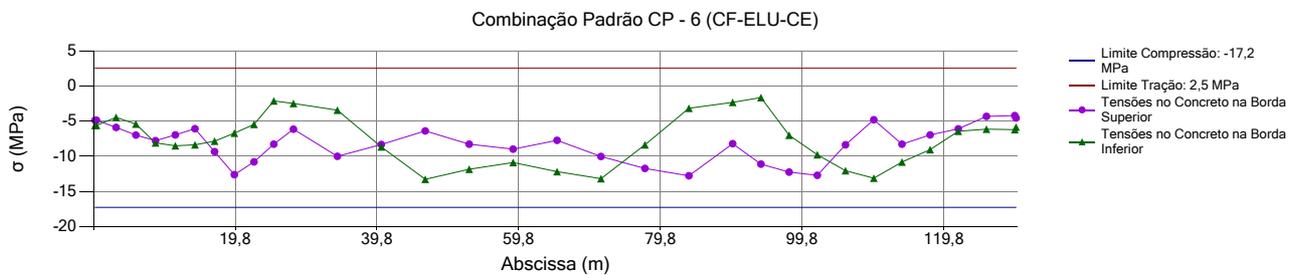
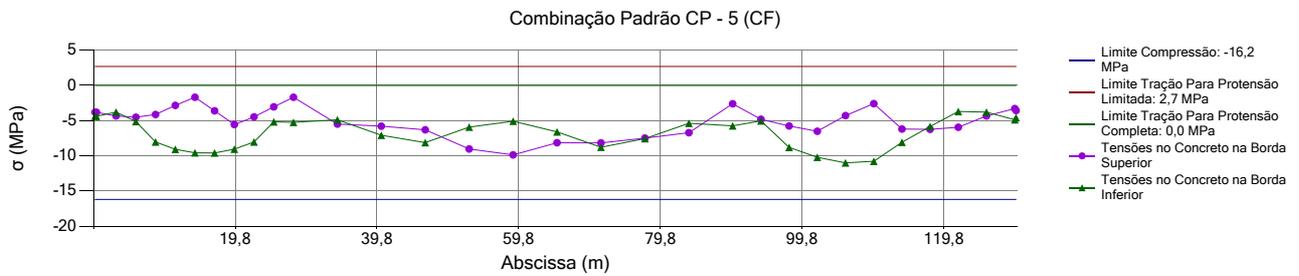
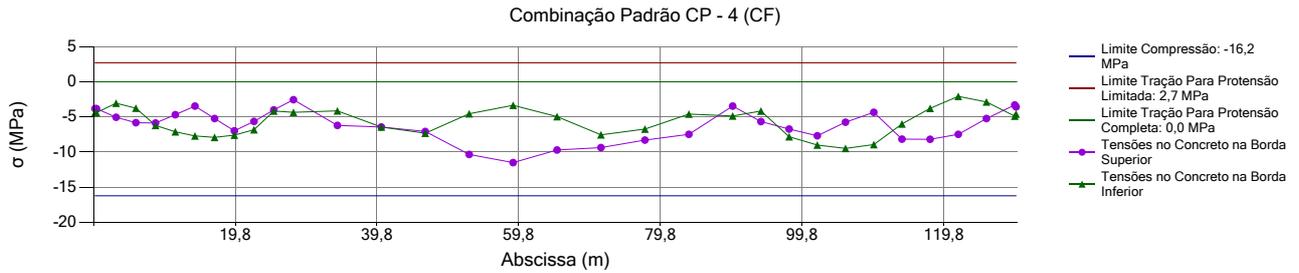
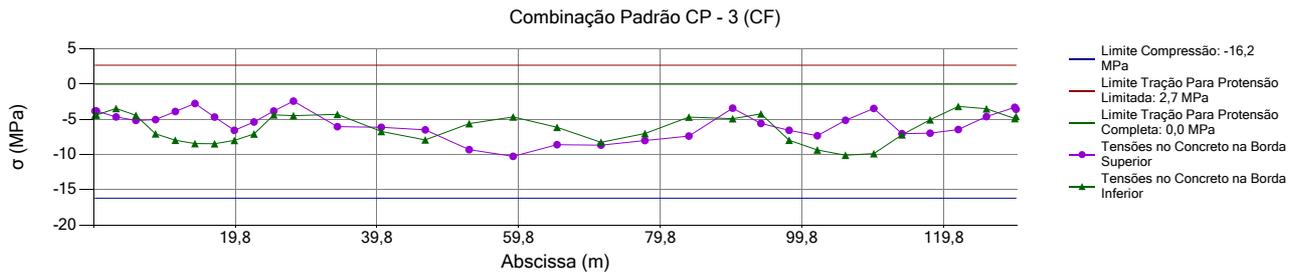
Seção	δ1 - Desl. Iniciais sem Prot. (cm)	δ2 - Des. Iniciais com Prot. (cm)	δ3 - Des. Finais sem Prot. (cm)	δ4 - Des. Finais com Prot. (cm)
0	-0,05	0,00	-0,18	-0,04
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,72	-0,02	2,53	0,51
3	1,46	0,01	5,12	1,20
4	2,17	0,08	7,59	1,94
5	2,65	0,11	9,31	2,43
6	2,98	0,10	10,48	2,69
7	2,92	0,00	10,30	2,38
8	2,67	-0,11	9,41	1,90
9	2,00	-0,12	7,06	1,31
10	1,15	-0,10	4,06	0,67
11	0,00	0,00	0,00	0,00
12	-3,05	0,28	-10,74	-1,69
13	-7,02	1,08	-24,79	-2,85
14	-11,03	1,84	-38,95	-4,15
15	-13,66	1,87	-48,28	-6,15
16	-14,95	1,77	-52,84	-7,41
17	-13,06	1,63	-46,12	-6,33
18	-9,98	1,27	-35,19	-4,83
19	-6,03	0,54	-21,20	-3,49
20	-2,35	-0,08	-8,23	-2,08
21	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1,08	0,12	3,78	1,20
23	1,47	0,51	5,13	2,51
24	1,51	0,95	5,22	3,68
25	0,92	1,44	3,05	4,42
26	0,11	1,79	0,13	4,64
27	-0,79	1,60	-3,11	3,39
28	-1,54	1,31	-5,76	2,04

Deslocamentos sob Ação de Cargas Permanentes

Seção	δ1 - Desl. Iniciais sem Prot. (cm)	δ2 - Des. Iniciais com Prot. (cm)	δ3 - Des. Finais sem Prot. (cm)	δ4 - Des. Finais com Prot. (cm)
29	-1,57	0,90	-5,77	1,01
30	-1,14	0,50	-4,15	0,38
31	0,00	0,00	0,00	0,00
32	0,06	-0,03	0,21	-0,03

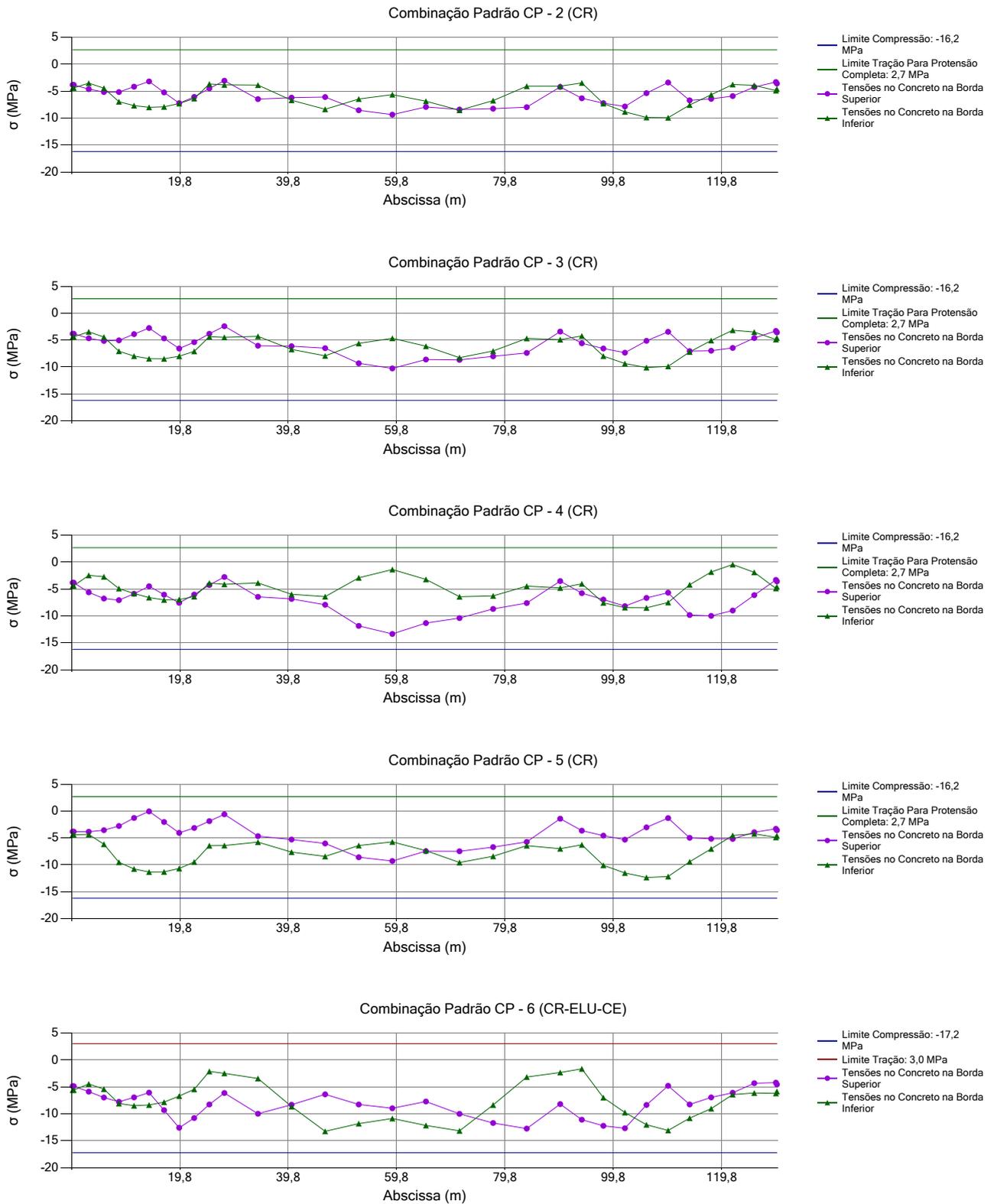


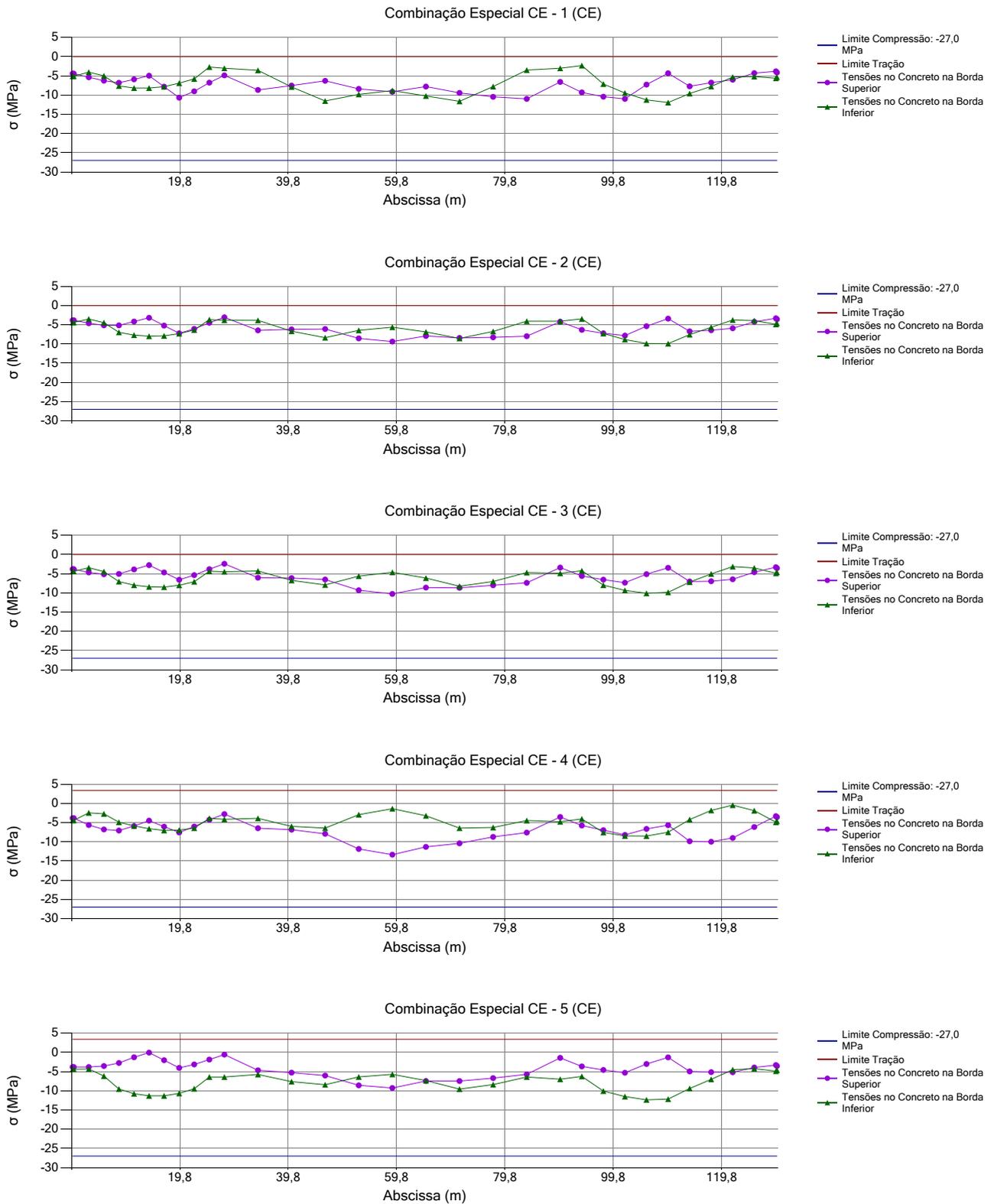


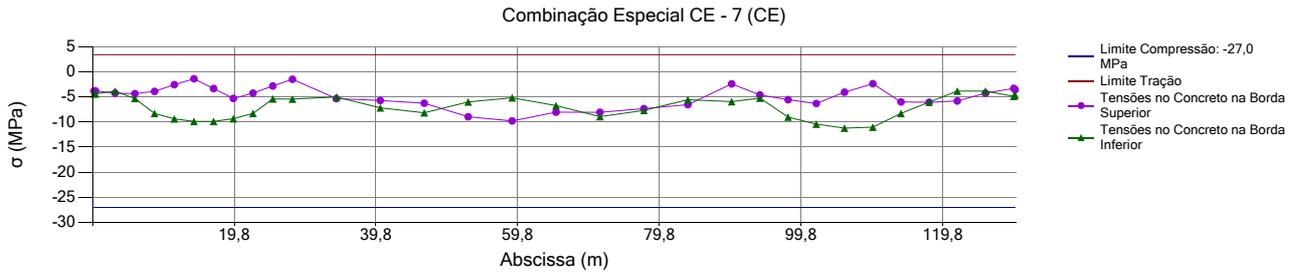
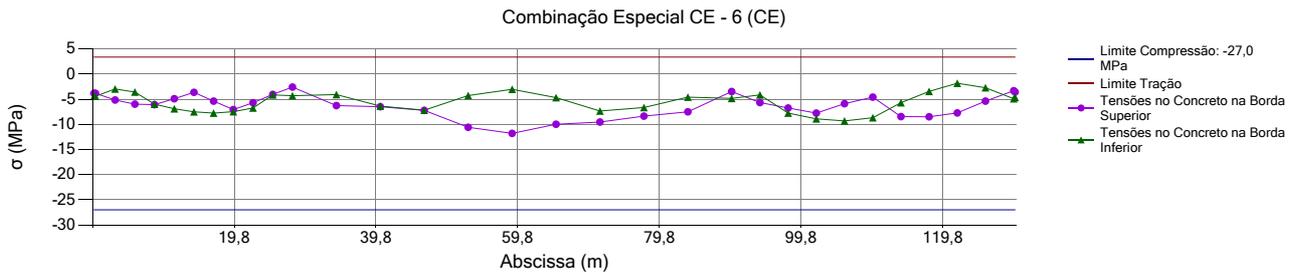


Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 4 Apoios.txt







APÊNDICE B

RELATÓRIO DE CÁLCULO – ESTRUTURA B – 2 APOIOS

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 2 Apoios.txt

Dados Iniciais

Número de Apoios: 2

Número de Seções: 13

Número de Propriedades Geométricas: 4

Número de Grupos de Cabos de Protensão: 2

Número de Combinações Adicionais: 7

Tipo de Estrutura: Ponte Rodoviária

Apoios

Número do Apoio	Abscissa do Apoio	Nome do Apoio
1	0,300	Apoio-1
2	36,700	Apoio-2

Características Geométricas das Seções

Número da Seção	Abscissa (m)	Área (m ²)	Inércia (m ⁴)	Altura (m)	Ycg (m)	Perímetro (m)
0	0,000	6,792	4,537	2,300	0,962	0,420
1	0,300	6,792	4,537	2,300	0,962	0,420
2	3,940	6,085	4,315	2,300	0,936	0,420
3	7,580	5,183	4,081	2,300	0,910	0,420
4	11,220	5,183	4,081	2,300	0,910	0,420
5	14,860	5,183	4,081	2,300	0,910	0,420
6	18,500	5,183	4,081	2,300	0,910	0,420
7	22,140	5,183	4,081	2,300	0,910	0,420
8	25,780	5,183	4,081	2,300	0,910	0,420
9	29,420	5,183	4,081	2,300	0,910	0,420
10	33,060	6,085	4,315	2,300	0,936	0,420
11	36,700	6,792	4,573	2,300	0,962	0,420
12	37,000	6,792	4,537	2,300	0,962	0,420

Envoltória de Momentos Fletores

Número da Seção	Mg-1 (KNm)	Mg-2 (KNm)	Mmáx (KNm)	Mmin (KNm)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	10.183,760	1.401,140	2.742,220	0,000
3	17.928,680	2.490,920	4.862,980	0,000
4	23.426,290	3.269,330	6.362,280	0,000
5	26.676,620	3.736,380	7.276,360	0,000
6	27.920,830	3.892,070	7.537,090	0,000
7	26.676,620	3.736,380	7.276,360	0,000
8	23.426,290	3.269,330	6.362,280	0,000
9	17.928,690	2.490,920	4.862,980	0,000
10	10.183,760	1.401,140	2.743,210	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000

Dados de Protensão

Módulo de Elasticidade Longitudinal do Aço: 195.000,00 MPa

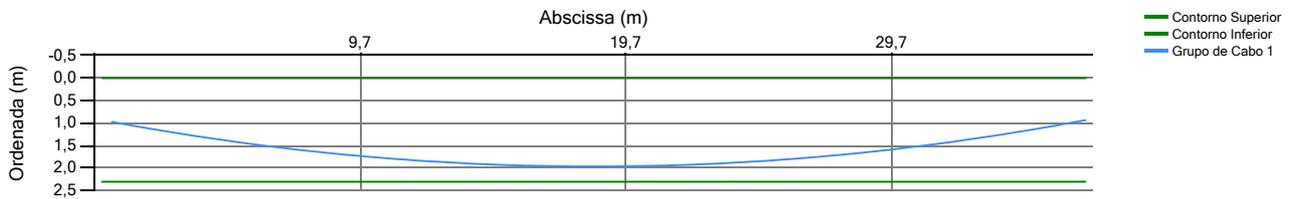
Dados de Protensão

Módulo de Elasticidade Longitudinal do Aço: 195.000,00 MPa
 Resistência Característica à Tração do Aço (f_{ptk}): 1.900,00 MPa
 Tipo de Cordoalhas: RB
 Coeficiente de Atrito entre o Cabo e a Bainha: 0,25
 Perda de Atrito por Metro: 0,25 % /m
 Escorregamento na Ancoragem: 0,006 m
 Umidade Relativa do Ar: 55,00 %
 Temperatura Ambiente: 20,00 °C
 Data da Protensão: 28,00 dias
 Nome do Material do Aço de Protensão: Aço-1
 Slump do Concreto: 0,08 cm
 Data de Início da Cura do Concreto: 7,00 dias
 Resistência Característica à Compressão do Concreto (f_{ck}): 40,00 MPa
 Tipo de Cimento: CP-III
 Tempo de Análise: infinito
 Nome do Material Concreto: Concreto-1

Grupos de Cabos de ProtensãoGrupo 1 - Prot-1

Área de Aço: 16,80 cm²
 Número de Cabos: 4
 Tensão Inicial: 1.520,00 MPa
 Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades
 Desvio Angular Horizontal: 0,00°
 Número de Pontos Notáveis: 3
 Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	0,93
2	18,50	1,96
3	37,00	0,93

Grupo 2 - Prot-2

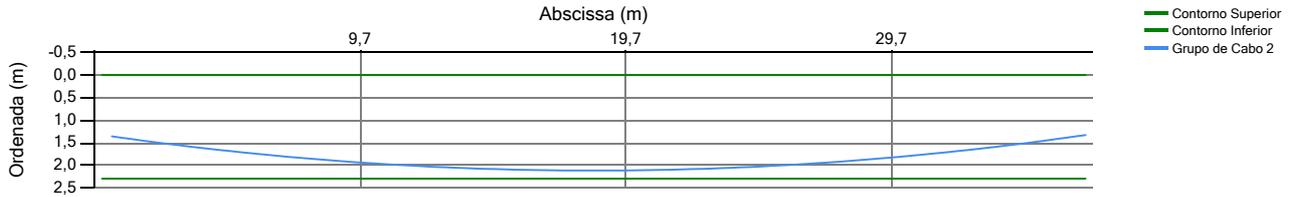
Área de Aço: 16,80 cm²
 Número de Cabos: 4
 Tensão Inicial: 1.520,00 MPa
 Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades
 Desvio Angular Horizontal: 0,00°
 Número de Pontos Notáveis: 3
 Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	1,33
2	18,50	2,12
3	37,00	1,33

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 2 Apoios.txt

Grupos de Cabos de Protensão



Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 1 - Prot-1

Área de Aço: 16,80 cm²

Número de Cabos: 4

Tensão Inicial: 1.520,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: -6,35°

Ângulo no Final do Cabo: 6,35°

Variação Angular Vertical: 12,71°

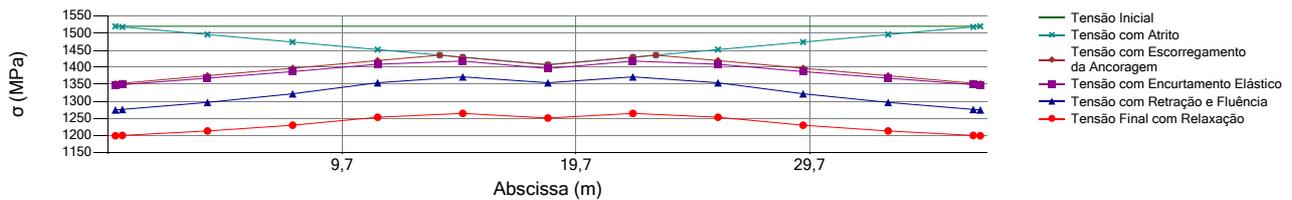
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 37,00 m

Comprimento Total do Cabo: 37,08 m

Alongamento do Cabo: 13,92 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 13,87 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσatr. (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσesc. (MPa)	Δσenc. (MPa)	σinst. (MPa)	Δσcs (MPa)	Δσr (MPa)	σfim (MPa)	Δσi (%)
0	0,93	-6,35	0,0	1.520,0	-168,7	-3,8	1.347,5	-72,3	-75,7	1.199,5	21,1
1	0,96	-6,25	-1,8	1.518,2	-165,0	-3,9	1.349,3	-72,8	-76,1	1.200,4	21,0
2	1,32	-5,01	-23,9	1.496,1	-120,8	-7,2	1.368,1	-70,9	-83,6	1.213,7	20,2
3	1,60	-3,76	-46,1	1.473,9	-76,5	-9,8	1.387,7	-65,0	-92,1	1.230,5	19,0
4	1,80	-2,51	-68,2	1.451,8	-32,3	-10,7	1.408,8	-54,0	-101,2	1.253,7	17,5
5	1,92	-1,26	-90,3	1.429,7	0,0	-11,2	1.418,4	-46,3	-107,3	1.264,8	16,8
6	1,96	0,00	-112,4	1.407,6	0,0	-11,1	1.396,4	-41,7	-103,4	1.251,3	17,7
7	1,92	1,26	-90,3	1.429,7	0,0	-11,2	1.418,4	-46,3	-107,3	1.264,8	16,8
8	1,80	2,51	-68,2	1.451,8	-32,3	-10,7	1.408,8	-54,0	-101,2	1.253,7	17,5
9	1,60	3,76	-46,1	1.473,9	-76,5	-9,8	1.387,7	-65,0	-92,1	1.230,5	19,0
10	1,32	5,01	-23,9	1.496,1	-120,8	-7,2	1.368,1	-70,9	-83,6	1.213,7	20,2
11	0,96	6,25	-1,8	1.518,2	-165,0	-3,9	1.349,3	-72,8	-76,1	1.200,4	21,0
12	0,93	6,35	0,0	1.520,0	-168,7	-3,8	1.347,5	-72,3	-75,7	1.199,5	21,1



Grupo 2 - Prot-2

Área de Aço: 16,80 cm²

Número de Cabos: 4

Tensão Inicial: 1.520,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: -4,88°

Ângulo no Final do Cabo: 4,88°

Variação Angular Vertical: 9,76°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 37,00 m

Comprimento Total do Cabo: 37,04 m

Alongamento do Cabo: 13,95 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 14,52 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσatr. (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσesc. (MPa)	Δσenc. (MPa)	σinst. (MPa)	Δσcs (MPa)	Δσr (MPa)	σfim (MPa)	Δσi (%)
0	1,33	-4,88	0,0	1.520,0	-161,2	0,0	1.358,8	-72,3	-75,7	1.210,9	20,3
1	1,36	-4,80	-1,7	1.518,3	-157,8	0,0	1.360,5	-72,8	-76,1	1.211,6	20,3
2	1,63	-3,85	-21,9	1.498,1	-117,4	0,0	1.380,7	-70,9	-83,6	1.226,3	19,3

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 2 - Prot-2

Área de Aço: 16,80 cm²

Número de Cabos: 4

Tensão Inicial: 1.520,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: -4,88°

Ângulo no Final do Cabo: 4,88°

Variação Angular Vertical: 9,76°

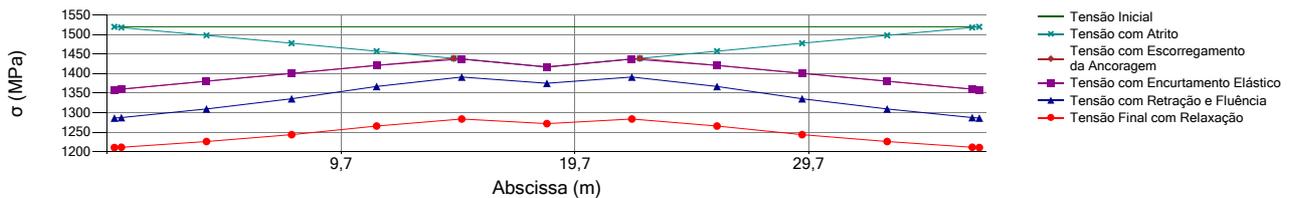
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 37,00 m

Comprimento Total do Cabo: 37,04 m

Alongamento do Cabo: 13,95 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 14,52 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
3	1,84	-2,89	-42,1	1.477,9	-77,0	0,0	1.400,9	-65,0	-92,1	1.243,7	18,2
4	2,00	-1,92	-62,3	1.457,7	-36,6	0,0	1.421,1	-54,0	-101,2	1.266,0	16,7
5	2,09	-0,96	-82,5	1.437,5	0,0	0,0	1.437,5	-46,3	-107,3	1.283,9	15,5
6	2,12	0,00	-102,7	1.417,3	0,0	0,0	1.417,3	-41,7	-103,4	1.272,2	16,3
7	2,09	0,96	-82,5	1.437,5	0,0	0,0	1.437,5	-46,3	-107,3	1.283,9	15,5
8	2,00	1,92	-62,3	1.457,7	-36,6	0,0	1.421,1	-54,0	-101,2	1.266,0	16,7
9	1,84	2,89	-42,1	1.477,9	-77,0	0,0	1.400,9	-65,0	-92,1	1.243,7	18,2
10	1,63	3,85	-21,9	1.498,1	-117,4	0,0	1.380,7	-70,9	-83,6	1.226,3	19,3
11	1,36	4,80	-1,7	1.518,3	-157,8	0,0	1.360,5	-72,8	-76,1	1.211,6	20,3
12	1,33	4,88	0,0	1.520,0	-161,2	0,0	1.358,8	-72,3	-75,7	1.210,9	20,3



Esforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
0	-18.097,94	-1.779,17	-3.060,17	-	-
1 esq.	-18.123,67	-1.752,82	-3.594,41	-	-
1 dir.	-18.123,67	-1.752,82	-3.594,41	-	-
2	-18.416,02	-1.424,88	-9.966,08	-	-
3	-18.707,12	-1.085,58	-15.219,58	-	-
4	-19.002,53	-735,21	-18.803,61	-	-
5	-19.188,46	-371,09	-21.017,90	-	-
6	-18.908,32	0,00	-21.377,64	-	-
7	-19.188,46	371,09	-21.017,90	-	-
8	-19.002,53	735,21	-18.803,61	-	-
9	-18.707,12	1.085,58	-15.219,58	-	-
10	-18.416,02	1.424,88	-9.966,08	-	-
11 esq.	-18.123,68	1.752,82	-3.594,41	-	-
11 dir.	-18.123,68	1.752,82	-3.594,41	-	-
12	-18.097,94	1.779,17	-3.060,17	-	-

Reações Hiperestáticas Iniciais

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 2: -

Esforços Finais de Protensão

Seção	Nfp (KN)	Vfp (KN)	Mfp (KNm)	Vhfp (KN)	Mhfp (KNm)
0	-16.118,82	-1.584,50	-2.727,17	-	-
1 esq.	-16.132,29	-1.560,12	-3.201,08	-	-
1 dir.	-16.132,29	-1.560,12	-3.201,08	-	-

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 2 Apoios.txt

Esforços Finais de Protensão					
Seção	Nfp (KN)	Vfp (KN)	Mfp (KNm)	Vhfp (KN)	Mhfp (KNm)
2	-16.346,68	-1.264,67	-8.847,69	-	-
3	-16.598,54	-963,14	-13.505,32	-	-
4	-16.919,09	-654,55	-16.742,87	-	-
5	-17.124,44	-331,14	-18.758,27	-	-
6	-16.957,66	0,00	-19.173,40	-	-
7	-17.124,44	331,14	-18.758,27	-	-
8	-16.919,09	654,55	-16.742,87	-	-
9	-16.598,54	963,14	-13.505,32	-	-
10	-16.346,68	1.264,67	-8.847,69	-	-
11 esq.	-16.132,45	1.560,14	-3.201,11	-	-
11 dir.	-16.132,45	1.560,14	-3.201,11	-	-
12	-16.118,82	1.584,50	-2.727,17	-	-

Reações Hiperestáticas Finais

Reação Hiperestática Final no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Final no Apoio 2: -

Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin

Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
0	Superior	-2,02	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-2,22
0	Inferior	-3,57	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,92
1	Superior	-1,91	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-2,10
1	Inferior	-3,73	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-4,10
2	Superior	-3,07	-2,98	-3,28	-3,46	-3,28	-3,16
2	Inferior	-2,96	-2,26	-1,82	-1,56	-1,82	-3,58
3	Superior	-4,21	-4,19	-4,74	-5,07	-4,74	-4,23
3	Inferior	-2,69	-1,70	-0,85	-0,35	-0,85	-3,57
4	Superior	-4,70	-4,75	-5,48	-5,91	-5,48	-4,64
4	Inferior	-2,09	-0,99	0,13*	0,78*	0,13*	-3,10
5	Superior	-4,96	-5,07	-5,90	-6,39	-5,90	-4,87
5	Inferior	-1,77	-0,61	0,67*	1,41*	0,67*	-2,86
6	Superior	-5,11	-5,22	-6,09	-6,59	-6,09	-5,00
6	Inferior	-1,42	-0,29	1,03*	1,80*	1,03*	-2,51
7	Superior	-4,96	-5,07	-5,90	-6,39	-5,90	-4,87
7	Inferior	-1,77	-0,61	0,67*	1,41*	0,67*	-2,86
8	Superior	-4,70	-4,75	-5,48	-5,91	-5,48	-4,64
8	Inferior	-2,09	-0,99	0,13*	0,78*	0,13*	-3,10
9	Superior	-4,21	-4,19	-4,74	-5,07	-4,74	-4,23
9	Inferior	-2,69	-1,70	-0,85	-0,35	-0,85	-3,57
10	Superior	-3,07	-2,98	-3,28	-3,46	-3,28	-3,16
10	Inferior	-2,96	-2,26	-1,82	-1,56	-1,82	-3,58
11	Superior	-1,91	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-2,10
11	Inferior	-3,72	-3,31	-3,31	-3,31	-3,31	-4,09
12	Superior	-2,02	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-2,22
12	Inferior	-3,57	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,92

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente (CQP)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CQP): -24,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP): -24,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): -28,00 MPa

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 2 Apoios.txt

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente (CQP)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CQP): -24,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP): -24,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): -28,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): 4,21 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CF): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,5*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,5*Mmin

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CF)	CP-2 (CF)	CP-3 (CF)	CP-4 (CF)	CP-5 (CF)	CP-6 (CF-ELU-CE)
0	Superior	-2,02	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-2,22
0	Inferior	-3,57	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,92
1	Superior	-1,91	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-2,10
1	Inferior	-3,73	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-4,10
2	Superior	-3,07	-2,98	-3,28	-3,58	-3,28	-3,16
2	Inferior	-2,96	-2,26	-1,82	-1,39	-1,82	-3,58
3	Superior	-4,21	-4,19	-4,74	-5,29	-4,74	-4,23
3	Inferior	-2,69	-1,70	-0,85	-0,02	-0,85	-3,57
4	Superior	-4,70	-4,75	-5,48	-6,19	-5,48	-4,64
4	Inferior	-2,09	-0,99	0,13*	1,21*	0,13*	-3,10
5	Superior	-4,96	-5,07	-5,90	-6,71	-5,90	-4,87
5	Inferior	-1,77	-0,61	0,67*	1,90*	0,67*	-2,86
6	Superior	-5,11	-5,22	-6,09	-6,93	-6,09	-5,00
6	Inferior	-1,42	-0,29	1,03*	2,32*	1,03*	-2,51
7	Superior	-4,96	-5,07	-5,90	-6,71	-5,90	-4,87
7	Inferior	-1,77	-0,61	0,67*	1,90*	0,67*	-2,86
8	Superior	-4,70	-4,75	-5,48	-6,19	-5,48	-4,64
8	Inferior	-2,09	-0,99	0,13*	1,21*	0,13*	-3,10
9	Superior	-4,21	-4,19	-4,74	-5,29	-4,74	-4,23
9	Inferior	-2,69	-1,70	-0,85	-0,02	-0,85	-3,57
10	Superior	-3,07	-2,98	-3,28	-3,58	-3,28	-3,16
10	Inferior	-2,96	-2,26	-1,82	-1,39	-1,82	-3,58
11	Superior	-1,91	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-2,10
11	Inferior	-3,72	-3,31	-3,31	-3,31	-3,31	-4,09
12	Superior	-2,02	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-2,22
12	Inferior	-3,57	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,92

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Frequente (CF)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CF): -24,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF): -24,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): -28,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 3,51 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 3,51 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): 4,21 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: 2 Apoios.txt

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1
 Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1
 Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2
 Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx
 Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmín
 Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
0	Superior	-2,02	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-2,22
0	Inferior	-3,57	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,92
1	Superior	-1,91	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-2,10
1	Inferior	-3,73	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-4,10
2	Superior	-3,07	-2,98	-3,28	-3,87	-3,28	-3,16
2	Inferior	-2,96	-2,26	-1,82	-0,95	-1,82	-3,58
3	Superior	-4,21	-4,19	-4,74	-5,83	-4,74	-4,23
3	Inferior	-2,69	-1,70	-0,85	0,81	-0,85	-3,57
4	Superior	-4,70	-4,75	-5,48	-6,90	-5,48	-4,64
4	Inferior	-2,09	-0,99	0,13	2,29	0,13	-3,10
5	Superior	-4,96	-5,07	-5,90	-7,53	-5,90	-4,87
5	Inferior	-1,77	-0,61	0,67	3,14	0,67	-2,86
6	Superior	-5,11	-5,22	-6,09	-7,77	-6,09	-5,00
6	Inferior	-1,42	-0,29	1,03	3,60*	1,03	-2,51
7	Superior	-4,96	-5,07	-5,90	-7,53	-5,90	-4,87
7	Inferior	-1,77	-0,61	0,67	3,14	0,67	-2,86
8	Superior	-4,70	-4,75	-5,48	-6,90	-5,48	-4,64
8	Inferior	-2,09	-0,99	0,13	2,29	0,13	-3,10
9	Superior	-4,21	-4,19	-4,74	-5,83	-4,74	-4,23
9	Inferior	-2,69	-1,70	-0,85	0,81	-0,85	-3,57
10	Superior	-3,07	-2,98	-3,28	-3,88	-3,28	-3,16
10	Inferior	-2,96	-2,26	-1,82	-0,95	-1,82	-3,58
11	Superior	-1,91	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-2,10
11	Inferior	-3,72	-3,31	-3,31	-3,31	-3,31	-4,09
12	Superior	-2,02	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-2,22
12	Inferior	-3,57	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,92

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Rara (CR)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CR): -24,00 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR): -24,00 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): -28,00 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 3,51 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 3,51 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): 4,21 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Especiais - CE (MPa)

Combinação Especial 1 (CE) : 1,0*Nip + 0,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 0,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 0,0*Mmín + 1,0*Mip + 0,0*Mfp + 1,0*Mhip + 0,0*Mhfp
 Combinação Especial 2 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 0,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 0,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 3 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 0,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 4 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 1,0*Mmáx + 0,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 5 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 1,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 6 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 0,5*Mmáx + 0,0*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp
 Combinação Especial 7 (CE) : 0,0*Nip + 1,0*Nfp + 1,0*Mg1 + 1,0*Mg2 + 0,0*Mmáx + 0,5*Mmín + 0,0*Mip + 1,0*Mfp + 0,0*Mhip + 1,0*Mhfp

Seção	Borda	CE-1 (CE)	CE-2 (CE)	CE-3 (CE)	CE-4 (CE)	CE-5 (CE)	CE-6 (CE)	CE-7 (CE)
0	Superior	-2,02	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79
0	Inferior	-3,57	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18

Tensões nas Seções - Combinação Especiais - CE (MPa)

Combinação Especial 1 (CE) : $1,0 \cdot N_{ip} + 0,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot Mg_1 + 0,0 \cdot Mg_2 + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 1,0 \cdot M_{ip} + 0,0 \cdot M_{fp} + 1,0 \cdot M_{hip} + 0,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 2 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot Mg_1 + 0,0 \cdot Mg_2 + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 3 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot Mg_1 + 1,0 \cdot Mg_2 + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 4 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot Mg_1 + 1,0 \cdot Mg_2 + 1,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 5 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot Mg_1 + 1,0 \cdot Mg_2 + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 1,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 6 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot Mg_1 + 1,0 \cdot Mg_2 + 0,5 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,0 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$ Combinação Especial 7 (CE) : $0,0 \cdot N_{ip} + 1,0 \cdot N_{fp} + 1,0 \cdot Mg_1 + 1,0 \cdot Mg_2 + 0,0 \cdot M_{m\acute{a}x} + 0,5 \cdot M_{m\acute{m}n} + 0,0 \cdot M_{ip} + 1,0 \cdot M_{fp} + 0,0 \cdot M_{hip} + 1,0 \cdot M_{hfp}$

Seção	Borda	CE-1 (CE)	CE-2 (CE)	CE-3 (CE)	CE-4 (CE)	CE-5 (CE)	CE-6 (CE)	CE-7 (CE)
1	Superior	-1,91	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70
1	Inferior	-3,73	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32	-3,32
2	Superior	-3,07	-2,98	-3,28	-3,87	-3,28	-3,58	-3,28
2	Inferior	-2,96	-2,26	-1,82	-0,95	-1,82	-1,39	-1,82
3	Superior	-4,21	-4,19	-4,74	-5,83	-4,74	-5,29	-4,74
3	Inferior	-2,69	-1,70	-0,85	0,81	-0,85	-0,02	-0,85
4	Superior	-4,70	-4,75	-5,48	-6,90	-5,48	-6,19	-5,48
4	Inferior	-2,09	-0,99	0,13*	2,29	0,13	1,21	0,13
5	Superior	-4,96	-5,07	-5,90	-7,53	-5,90	-6,71	-5,90
5	Inferior	-1,77	-0,61	0,67*	3,14	0,67	1,90	0,67
6	Superior	-5,11	-5,22	-6,09	-7,77	-6,09	-6,93	-6,09
6	Inferior	-1,42	-0,29	1,03*	3,60*	1,03	2,32	1,03
7	Superior	-4,96	-5,07	-5,90	-7,53	-5,90	-6,71	-5,90
7	Inferior	-1,77	-0,61	0,67*	3,14	0,67	1,90	0,67
8	Superior	-4,70	-4,75	-5,48	-6,90	-5,48	-6,19	-5,48
8	Inferior	-2,09	-0,99	0,13*	2,29	0,13	1,21	0,13
9	Superior	-4,21	-4,19	-4,74	-5,83	-4,74	-5,29	-4,74
9	Inferior	-2,69	-1,70	-0,85	0,81	-0,85	-0,02	-0,85
10	Superior	-3,07	-2,98	-3,28	-3,88	-3,28	-3,58	-3,28
10	Inferior	-2,96	-2,26	-1,82	-0,95	-1,82	-1,39	-1,82
11	Superior	-1,91	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70
11	Inferior	-3,72	-3,31	-3,31	-3,31	-3,31	-3,31	-3,31
12	Superior	-2,02	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79	-1,79
12	Inferior	-3,57	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18	-3,18

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Especiais (CE)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-1 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-1 : 0,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-2 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-2 : 0,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-3 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-3 : 0,00 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-4 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-4 : 3,40 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-5 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-5 : 3,40 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-6 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-6 : 3,40 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Especial CE-7 : -27,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Especial CE-7 : 3,40 MPa

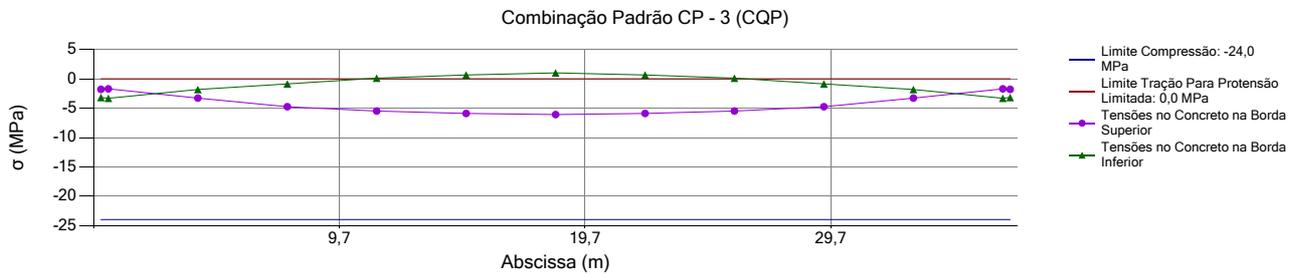
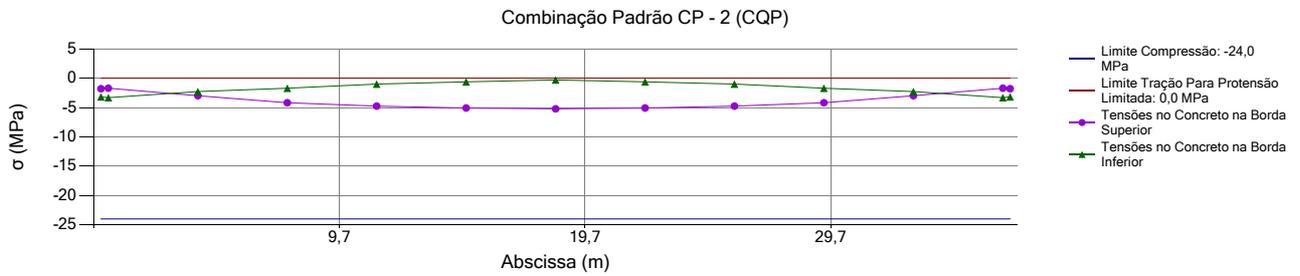
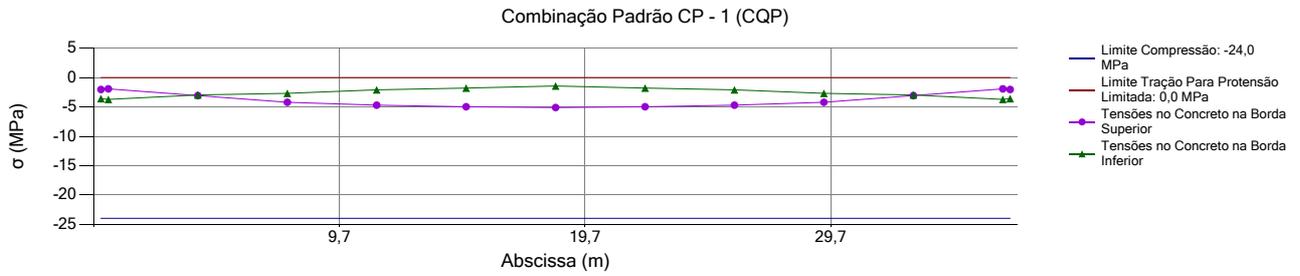
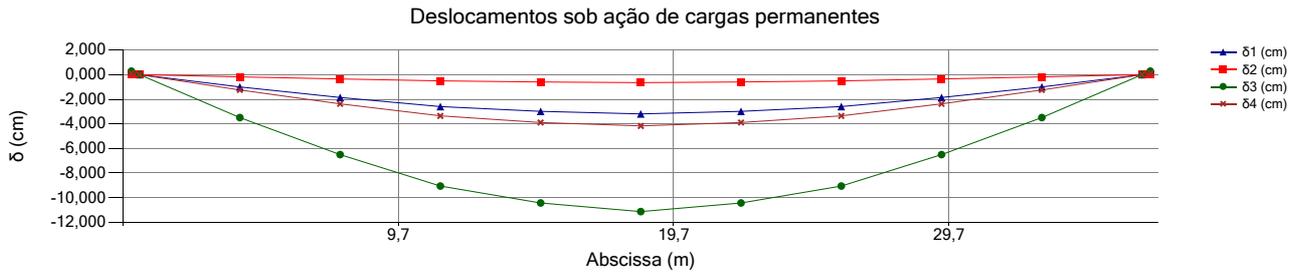
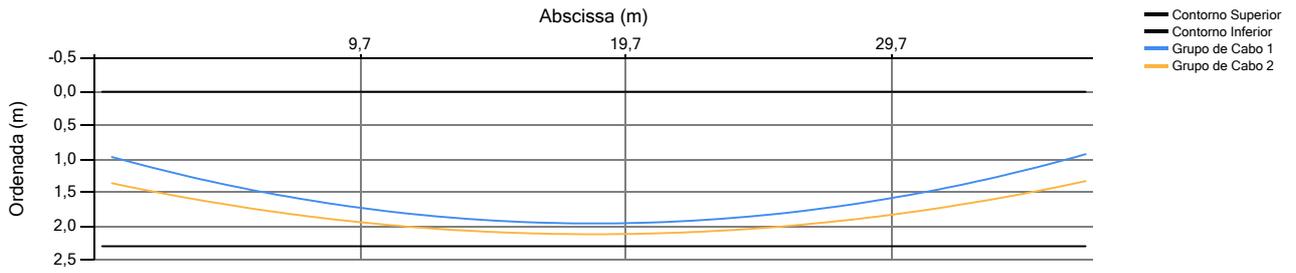
Classificação Quanto ao Grau de Protensão (NBR-6118/2007)

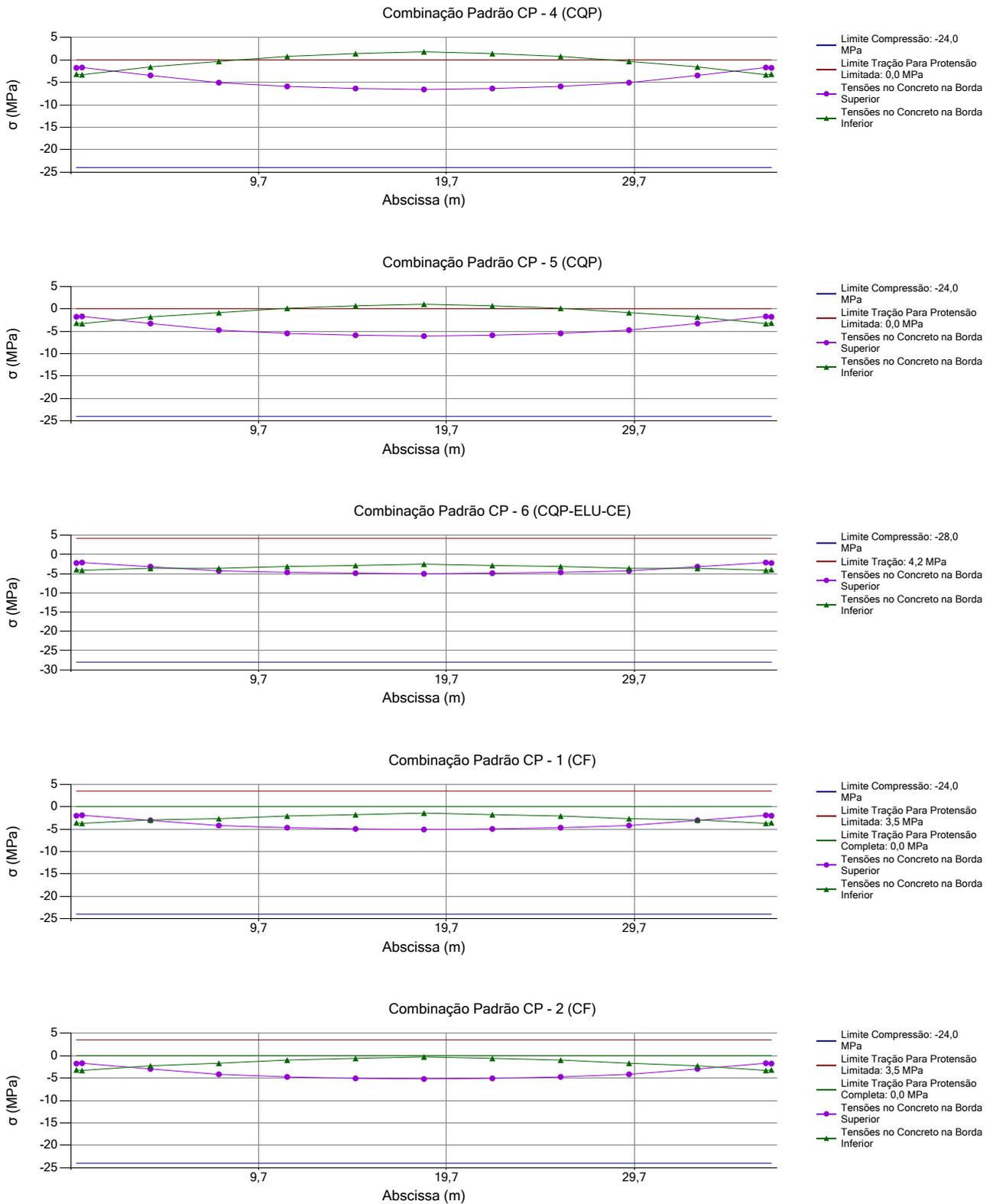
Tipo de Concreto Estrutural	Exigências Relativas à Fissuração	Combinação de Ações em Serviço a Utilizar	Status da Verificação
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Combinação Frequente (CF)	Efetuar Verificação
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)	ELS-F	Combinação Frequente (CF)	Atendida
	ELS-D	Combinação Quase Permanente (CQP)	Não Atendida
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)	ELS-F	Combinação Rara (CR)	Não Atendida
	ELS-D	Combinação Frequente (CF)	Não Atendida

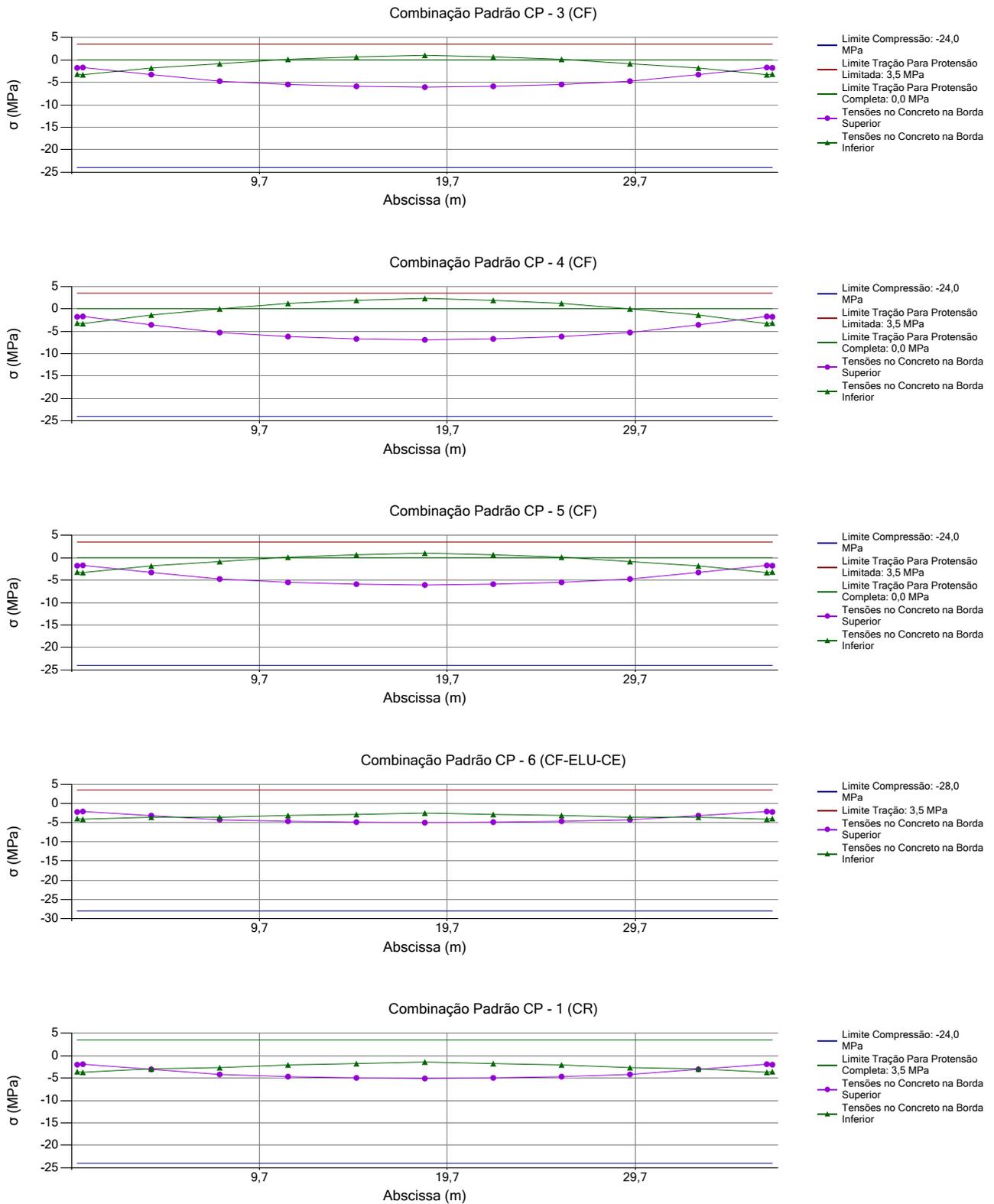
A estrutura deve ser verificada segundo os requisitos prescritos pela NBR-6118/2007 para Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)

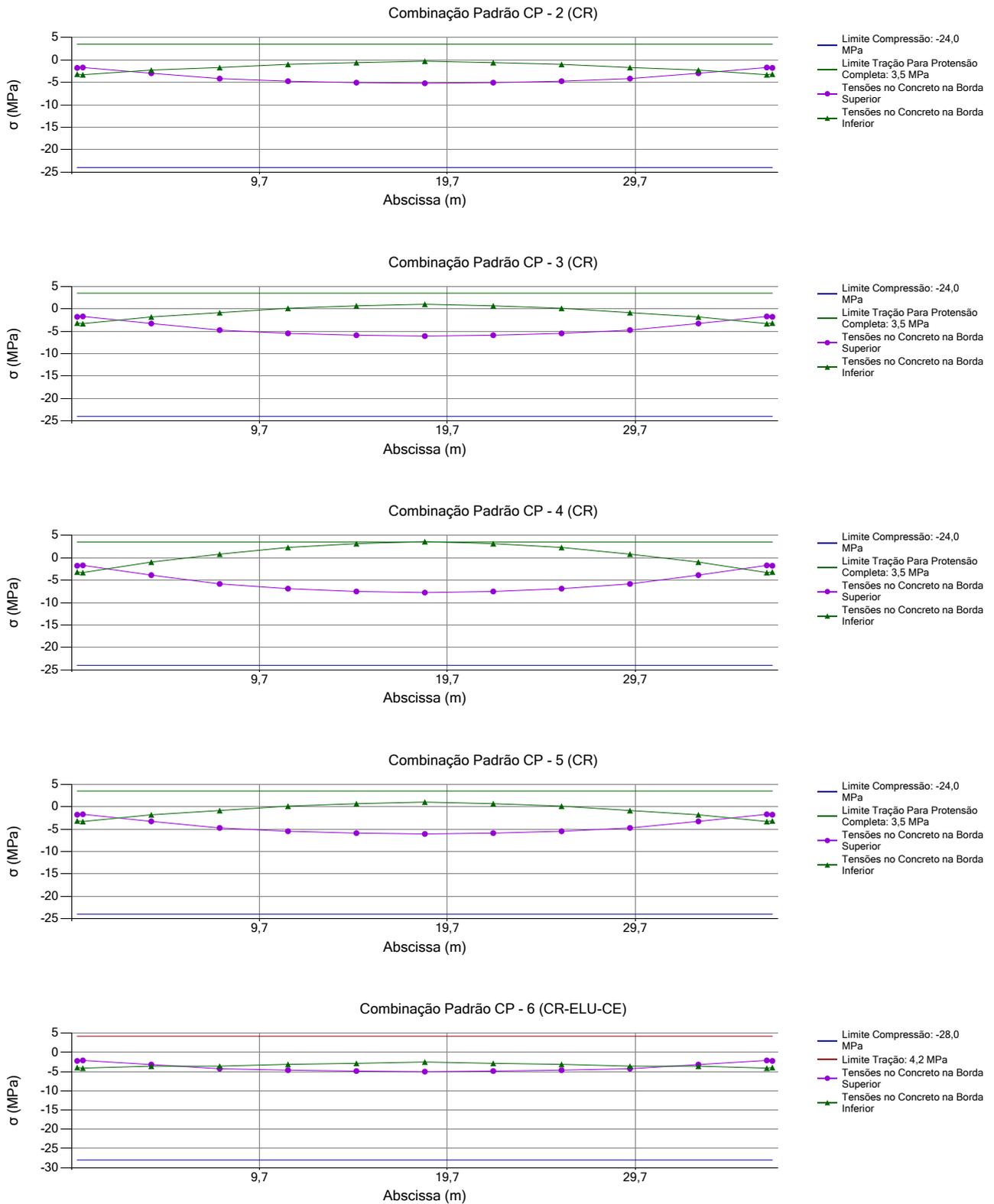
Deslocamentos sob Ação de Cargas Permanentes

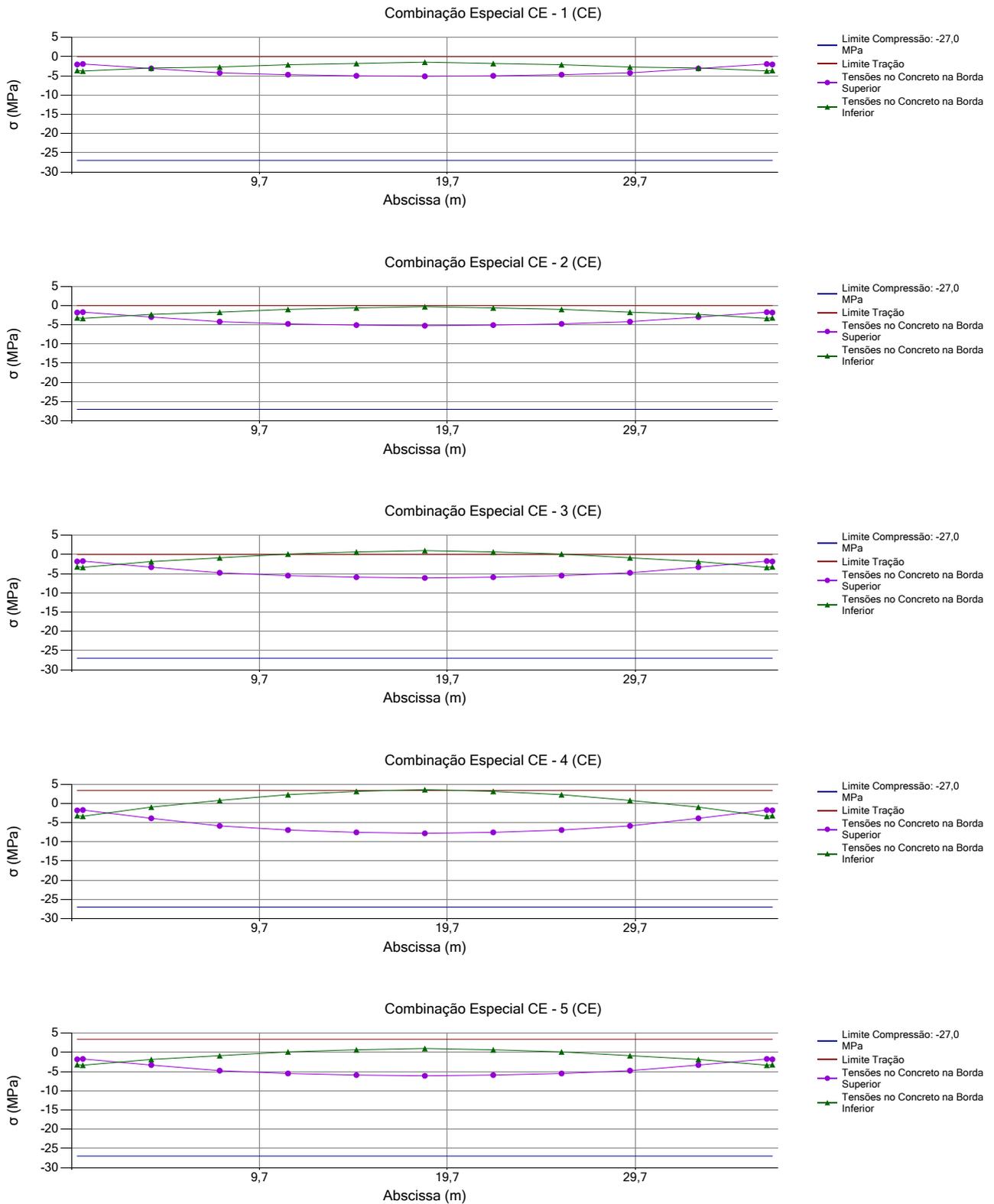
Seção	δ_1 - Desl. Iniciais sem Prot. (cm)	δ_2 - Des. Iniciais com Prot. (cm)	δ_3 - Des. Finais sem Prot. (cm)	δ_4 - Des. Finais com Prot. (cm)
0	0,08	0,01	0,29	0,10
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-1,00	-0,18	-3,48	-1,24
3	-1,86	-0,35	-6,49	-2,37
4	-2,58	-0,50	-9,04	-3,34
5	-2,98	-0,59	-10,41	-3,88
6	-3,18	-0,64	-11,11	-4,16
7	-2,98	-0,59	-10,41	-3,88
8	-2,58	-0,50	-9,04	-3,34
9	-1,86	-0,35	-6,49	-2,37
10	-1,00	-0,18	-3,48	-1,24
11	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,08	0,01	0,29	0,10

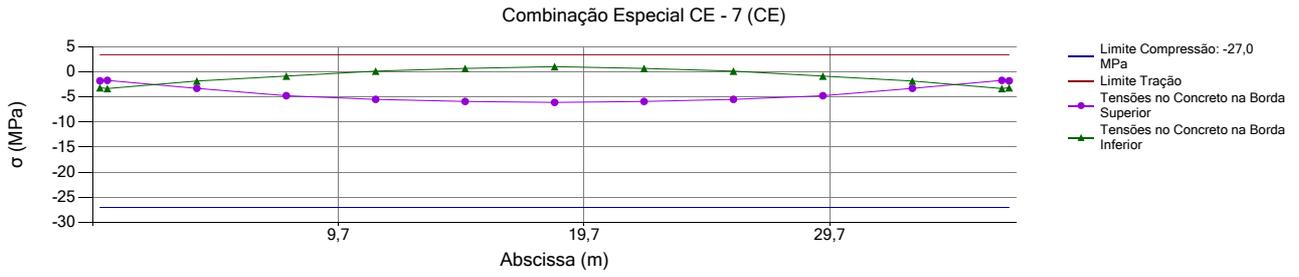
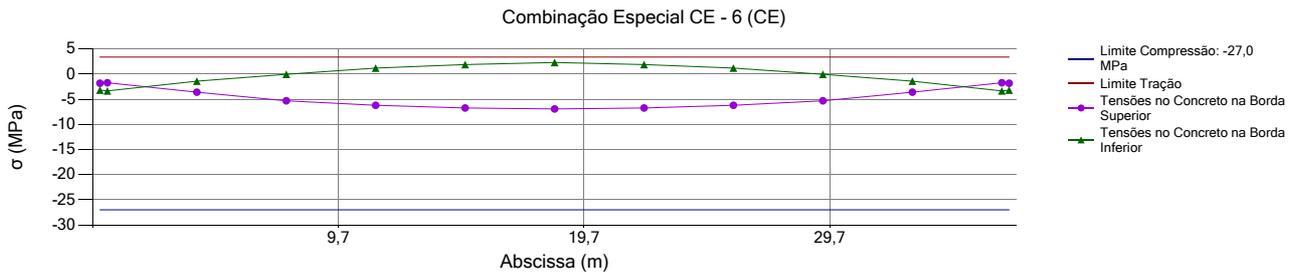












APÊNDICE C

RELATÓRIO DE CÁLCULO – VIGAS 1 E 2 – CASO 1

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=0,0\text{mm}$).txtDados Iniciais

Número de Apoios: 2

Número de Seções: 21

Número de Propriedades Geométricas: 1

Número de Grupos de Cabos de Protensão: 1

Número de Combinações Adicionais: 0

Tipo de Estrutura: Passarela de Pedestre

Apoios

Número do Apoio	Abcissa do Apoio	Nome do Apoio
1	0,000	Apoio-1
2	3,000	Apoio-2

Características Geométricas das Seções

Número da Seção	Abcissa (m)	Área (m ²)	Inércia (m ⁴)	Altura (m)	Ycg (m)	Perímetro (m)
0	0,000	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
1	0,150	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
2	0,300	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
3	0,450	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
4	0,600	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
5	0,750	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
6	0,900	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
7	1,050	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
8	1,200	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
9	1,350	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
10	1,500	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
11	1,650	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
12	1,800	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
13	1,950	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
14	2,100	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
15	2,250	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
16	2,400	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
17	2,550	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
18	2,700	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
19	2,850	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
20	3,000	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000

Envoltória de Momentos Fletores

Número da Seção	Mg-1 (KNm)	Mg-2 (KNm)	Mmáx (KNm)	Mmin (KNm)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	1,340	0,000	0,000	0,000
2	2,530	0,000	0,000	0,000
3	3,590	0,000	0,000	0,000
4	4,500	0,000	0,000	0,000
5	5,270	0,000	0,000	0,000
6	5,910	0,000	0,000	0,000
7	6,400	0,000	0,000	0,000
8	6,750	0,000	0,000	0,000
9	6,960	0,000	0,000	0,000
10	7,030	0,000	0,000	0,000
11	6,960	0,000	0,000	0,000
12	6,750	0,000	0,000	0,000
13	6,400	0,000	0,000	0,000
14	5,910	0,000	0,000	0,000
15	5,270	0,000	0,000	0,000
16	4,500	0,000	0,000	0,000
17	3,590	0,000	0,000	0,000
18	2,530	0,000	0,000	0,000
19	1,340	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
-----------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000

Dados de Protensão

Módulo de Elasticidade Longitudinal do Aço: 205.000,00 MPa
 Resistência Característica à Tração do Aço (f_{ptk}): 1.670,00 MPa
 Tipo de Cordoalhas: RB
 Coeficiente de Atrito entre o Cabo e a Bainha: 0,30
 Perda de Atrito por Metro: 0,60 % /m
 Escorregamento na Ancoragem: 0,000 m
 Umidade Relativa do Ar: 20,90 %
 Temperatura Ambiente: 32,20 °C
 Data da Protensão: 135,00 dias
 Nome do Material do Aço de Protensão: Aço-1
 Slump do Concreto: 12,00 cm
 Data de Início da Cura do Concreto: 11,06 dias
 Resistência Característica à Compressão do Concreto (f_{ck}): 31,03 MPa
 Tipo de Cimento: CP-IV
 Tempo de Análise: 10950 dias
 Nome do Material Concreto: Concreto-1

Grupos de Cabos de ProtensãoGrupo 1 - Prot-1

Área de Aço: 20,40 cm²
 Número de Cabos: 1
 Tensão Inicial: 1.239,00 MPa
 Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades
 Desvio Angular Horizontal: 0,00°
 Número de Pontos Notáveis: 2

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	0,25
2	3,00	0,25

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=0,0\text{mm}$).txt

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 1 - Prot-1

Área de Aço: 20,40 cm²

Número de Cabos: 1

Tensão Inicial: 1.239,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 0,00°

Ângulo no Final do Cabo: 0,00°

Variação Angular Vertical: 0,00°

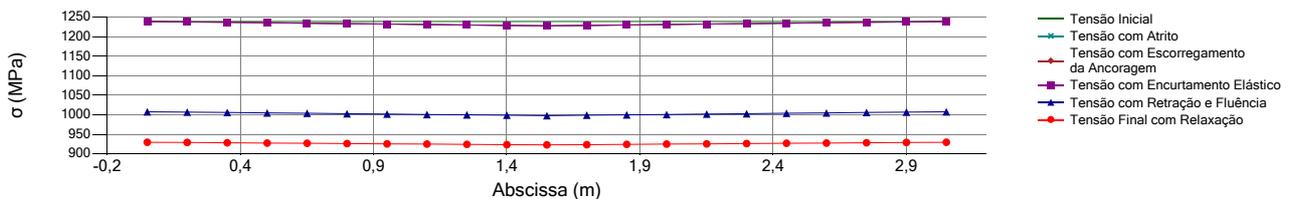
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 3,00 m

Comprimento Total do Cabo: 3,00 m

Alongamento do Cabo: 0,90 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 0,00 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
0	0,25	0,00	0,0	1.239,0	0,0	0,0	1.239,0	-231,2	-78,1	929,7	25,0
1	0,25	0,00	-1,1	1.237,9	0,0	0,0	1.237,9	-231,1	-77,8	929,0	25,0
2	0,25	0,00	-2,2	1.236,8	0,0	0,0	1.236,8	-230,9	-77,5	928,3	25,1
3	0,25	0,00	-3,3	1.235,7	0,0	0,0	1.235,7	-230,8	-77,2	927,6	25,1
4	0,25	0,00	-4,5	1.234,5	0,0	0,0	1.234,5	-230,7	-76,9	927,0	25,2
5	0,25	0,00	-5,6	1.233,4	0,0	0,0	1.233,4	-230,6	-76,6	926,3	25,2
6	0,25	0,00	-6,7	1.232,3	0,0	0,0	1.232,3	-230,5	-76,3	925,6	25,3
7	0,25	0,00	-7,8	1.231,2	0,0	0,0	1.231,2	-230,3	-76,0	924,9	25,4
8	0,25	0,00	-8,9	1.230,1	0,0	0,0	1.230,1	-230,2	-75,7	924,2	25,4
9	0,25	0,00	-10,0	1.229,0	0,0	0,0	1.229,0	-230,1	-75,4	923,5	25,5
10	0,25	0,00	-11,2	1.227,8	0,0	0,0	1.227,8	-230,0	-75,1	922,8	25,5
11	0,25	0,00	-10,0	1.229,0	0,0	0,0	1.229,0	-230,1	-75,4	923,5	25,5
12	0,25	0,00	-8,9	1.230,1	0,0	0,0	1.230,1	-230,2	-75,7	924,2	25,4
13	0,25	0,00	-7,8	1.231,2	0,0	0,0	1.231,2	-230,3	-76,0	924,9	25,4
14	0,25	0,00	-6,7	1.232,3	0,0	0,0	1.232,3	-230,5	-76,3	925,6	25,3
15	0,25	0,00	-5,6	1.233,4	0,0	0,0	1.233,4	-230,6	-76,6	926,3	25,2
16	0,25	0,00	-4,5	1.234,5	0,0	0,0	1.234,5	-230,7	-76,9	927,0	25,2
17	0,25	0,00	-3,3	1.235,7	0,0	0,0	1.235,7	-230,8	-77,2	927,6	25,1
18	0,25	0,00	-2,2	1.236,8	0,0	0,0	1.236,8	-230,9	-77,5	928,3	25,1
19	0,25	0,00	-1,1	1.237,9	0,0	0,0	1.237,9	-231,1	-77,8	929,0	25,0
20	0,25	0,00	0,0	1.239,0	0,0	0,0	1.239,0	-231,2	-78,1	929,7	25,0



Esforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
0 esq.	-2.527,56	0,00	0,00	-	-
0 dir.	-2.527,56	0,00	0,00	-	-
1	-2.525,29	0,00	0,00	-	-
2	-2.523,01	0,00	0,00	-	-
3	-2.520,74	0,00	0,00	-	-
4	-2.518,46	0,00	0,00	-	-
5	-2.516,19	0,00	0,00	-	-
6	-2.513,91	0,00	0,00	-	-
7	-2.511,64	0,00	0,00	-	-
8	-2.509,36	0,00	0,00	-	-
9	-2.507,09	0,00	0,00	-	-
10	-2.504,81	0,00	0,00	-	-
11	-2.507,09	0,00	0,00	-	-
12	-2.509,36	0,00	0,00	-	-

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=0,0\text{mm}$).txtEsforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
13	-2.511,64	0,00	0,00	-	-
14	-2.513,91	0,00	0,00	-	-
15	-2.516,19	0,00	0,00	-	-
16	-2.518,46	0,00	0,00	-	-
17	-2.520,74	0,00	0,00	-	-
18	-2.523,01	0,00	0,00	-	-
19	-2.525,29	0,00	0,00	-	-
20 esq.	-2.527,56	0,00	0,00	-	-
20 dir.	-2.527,56	0,00	0,00	-	-

Reações Hiperestáticas Iniciais

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 2: -

Esforços Finais de Protensão

Seção	Nfp (KN)	Vfp (KN)	Mfp (KNm)	Vhfp (KN)	Mhfp (KNm)
0 esq.	-1.896,62	0,00	0,00	-	-
0 dir.	-1.896,62	0,00	0,00	-	-
1	-1.895,22	0,00	0,00	-	-
2	-1.893,81	0,00	0,00	-	-
3	-1.892,40	0,00	0,00	-	-
4	-1.891,00	0,00	0,00	-	-
5	-1.889,59	0,00	0,00	-	-
6	-1.888,18	0,00	0,00	-	-
7	-1.886,77	0,00	0,00	-	-
8	-1.885,36	0,00	0,00	-	-
9	-1.883,95	0,00	0,00	-	-
10	-1.882,54	0,00	0,00	-	-
11	-1.883,95	0,00	0,00	-	-
12	-1.885,36	0,00	0,00	-	-
13	-1.886,77	0,00	0,00	-	-
14	-1.888,18	0,00	0,00	-	-
15	-1.889,59	0,00	0,00	-	-
16	-1.891,00	0,00	0,00	-	-
17	-1.892,40	0,00	0,00	-	-
18	-1.893,81	0,00	0,00	-	-
19	-1.895,22	0,00	0,00	-	-
20 esq.	-1.896,62	0,00	0,00	-	-
20 dir.	-1.896,62	0,00	0,00	-	-

Reações Hiperestáticas Finais

Reação Hiperestática Final no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Final no Apoio 2: -

Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin

Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
0	Superior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12
0	Inferior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12
1	Superior	-10,17	-7,65	-7,65	-7,65	-7,65	-11,18
1	Inferior	-10,03	-7,51	-7,51	-7,51	-7,51	-11,04

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=0,0\text{mm}$).txtTensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin

Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
2	Superior	-10,22	-7,70	-7,70	-7,70	-7,70	-11,23
2	Inferior	-9,97	-7,45	-7,45	-7,45	-7,45	-10,97
3	Superior	-10,26	-7,75	-7,75	-7,75	-7,75	-11,27
3	Inferior	-9,90	-7,39	-7,39	-7,39	-7,39	-10,91
4	Superior	-10,30	-7,79	-7,79	-7,79	-7,79	-11,31
4	Inferior	-9,85	-7,34	-7,34	-7,34	-7,34	-10,86
5	Superior	-10,33	-7,82	-7,82	-7,82	-7,82	-11,33
5	Inferior	-9,80	-7,29	-7,29	-7,29	-7,29	-10,81
6	Superior	-10,35	-7,85	-7,85	-7,85	-7,85	-11,36
6	Inferior	-9,76	-7,26	-7,26	-7,26	-7,26	-10,77
7	Superior	-10,37	-7,87	-7,87	-7,87	-7,87	-11,37
7	Inferior	-9,73	-7,23	-7,23	-7,23	-7,23	-10,73
8	Superior	-10,37	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
8	Inferior	-9,70	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,70
9	Superior	-10,38	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
9	Inferior	-9,68	-7,19	-7,19	-7,19	-7,19	-10,68
10	Superior	-10,37	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,37
10	Inferior	-9,67	-7,18	-7,18	-7,18	-7,18	-10,67
11	Superior	-10,38	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
11	Inferior	-9,68	-7,19	-7,19	-7,19	-7,19	-10,68
12	Superior	-10,37	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
12	Inferior	-9,70	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,70
13	Superior	-10,37	-7,87	-7,87	-7,87	-7,87	-11,37
13	Inferior	-9,73	-7,23	-7,23	-7,23	-7,23	-10,73
14	Superior	-10,35	-7,85	-7,85	-7,85	-7,85	-11,36
14	Inferior	-9,76	-7,26	-7,26	-7,26	-7,26	-10,77
15	Superior	-10,33	-7,82	-7,82	-7,82	-7,82	-11,33
15	Inferior	-9,80	-7,29	-7,29	-7,29	-7,29	-10,81
16	Superior	-10,30	-7,79	-7,79	-7,79	-7,79	-11,31
16	Inferior	-9,85	-7,34	-7,34	-7,34	-7,34	-10,86
17	Superior	-10,26	-7,75	-7,75	-7,75	-7,75	-11,27
17	Inferior	-9,90	-7,39	-7,39	-7,39	-7,39	-10,91
18	Superior	-10,22	-7,70	-7,70	-7,70	-7,70	-11,23
18	Inferior	-9,97	-7,45	-7,45	-7,45	-7,45	-10,97
19	Superior	-10,17	-7,65	-7,65	-7,65	-7,65	-11,18
19	Inferior	-10,03	-7,51	-7,51	-7,51	-7,51	-11,04
20	Superior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12
20	Inferior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente (CQP)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CQP): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): -21,72 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): 3,55 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CF): Efp + Hfp + Mg1

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=0,0\text{mm}$).txt

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): $1.1 \cdot E_{ip} + 1.1 \cdot H_{ip} + Mg_1$ Combinação Padrão 2 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1$ Combinação Padrão 3 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1 + Mg_2$ Combinação Padrão 4 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1 + Mg_2 + 0,4 \cdot M_{\text{máx}}$ Combinação Padrão 5 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1 + Mg_2 + 0,4 \cdot M_{\text{mín}}$ Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): $1.1 \cdot E_{ip} + 1.1 \cdot H_{ip} + Mg_1$

Seção	Borda	CP-1 (CF)	CP-2 (CF)	CP-3 (CF)	CP-4 (CF)	CP-5 (CF)	CP-6 (CF-ELU-CE)
0	Superior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12
0	Inferior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12
1	Superior	-10,17	-7,65	-7,65	-7,65	-7,65	-11,18
1	Inferior	-10,03	-7,51	-7,51	-7,51	-7,51	-11,04
2	Superior	-10,22	-7,70	-7,70	-7,70	-7,70	-11,23
2	Inferior	-9,97	-7,45	-7,45	-7,45	-7,45	-10,97
3	Superior	-10,26	-7,75	-7,75	-7,75	-7,75	-11,27
3	Inferior	-9,90	-7,39	-7,39	-7,39	-7,39	-10,91
4	Superior	-10,30	-7,79	-7,79	-7,79	-7,79	-11,31
4	Inferior	-9,85	-7,34	-7,34	-7,34	-7,34	-10,86
5	Superior	-10,33	-7,82	-7,82	-7,82	-7,82	-11,33
5	Inferior	-9,80	-7,29	-7,29	-7,29	-7,29	-10,81
6	Superior	-10,35	-7,85	-7,85	-7,85	-7,85	-11,36
6	Inferior	-9,76	-7,26	-7,26	-7,26	-7,26	-10,77
7	Superior	-10,37	-7,87	-7,87	-7,87	-7,87	-11,37
7	Inferior	-9,73	-7,23	-7,23	-7,23	-7,23	-10,73
8	Superior	-10,37	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
8	Inferior	-9,70	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,70
9	Superior	-10,38	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
9	Inferior	-9,68	-7,19	-7,19	-7,19	-7,19	-10,68
10	Superior	-10,37	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,37
10	Inferior	-9,67	-7,18	-7,18	-7,18	-7,18	-10,67
11	Superior	-10,38	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
11	Inferior	-9,68	-7,19	-7,19	-7,19	-7,19	-10,68
12	Superior	-10,37	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
12	Inferior	-9,70	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,70
13	Superior	-10,37	-7,87	-7,87	-7,87	-7,87	-11,37
13	Inferior	-9,73	-7,23	-7,23	-7,23	-7,23	-10,73
14	Superior	-10,35	-7,85	-7,85	-7,85	-7,85	-11,36
14	Inferior	-9,76	-7,26	-7,26	-7,26	-7,26	-10,77
15	Superior	-10,33	-7,82	-7,82	-7,82	-7,82	-11,33
15	Inferior	-9,80	-7,29	-7,29	-7,29	-7,29	-10,81
16	Superior	-10,30	-7,79	-7,79	-7,79	-7,79	-11,31
16	Inferior	-9,85	-7,34	-7,34	-7,34	-7,34	-10,86
17	Superior	-10,26	-7,75	-7,75	-7,75	-7,75	-11,27
17	Inferior	-9,90	-7,39	-7,39	-7,39	-7,39	-10,91
18	Superior	-10,22	-7,70	-7,70	-7,70	-7,70	-11,23
18	Inferior	-9,97	-7,45	-7,45	-7,45	-7,45	-10,97
19	Superior	-10,17	-7,65	-7,65	-7,65	-7,65	-11,18
19	Inferior	-10,03	-7,51	-7,51	-7,51	-7,51	-11,04
20	Superior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12
20	Inferior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Frequente (CF)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): -21,72 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 2,96 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=0,0\text{mm}$).txtLimite de Tensões nas Seções - Combinação Frequente (CF)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): -21,72 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 2,96 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): 3,55 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx

Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmin

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
0	Superior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12
0	Inferior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12
1	Superior	-10,17	-7,65	-7,65	-7,65	-7,65	-11,18
1	Inferior	-10,03	-7,51	-7,51	-7,51	-7,51	-11,04
2	Superior	-10,22	-7,70	-7,70	-7,70	-7,70	-11,23
2	Inferior	-9,97	-7,45	-7,45	-7,45	-7,45	-10,97
3	Superior	-10,26	-7,75	-7,75	-7,75	-7,75	-11,27
3	Inferior	-9,90	-7,39	-7,39	-7,39	-7,39	-10,91
4	Superior	-10,30	-7,79	-7,79	-7,79	-7,79	-11,31
4	Inferior	-9,85	-7,34	-7,34	-7,34	-7,34	-10,86
5	Superior	-10,33	-7,82	-7,82	-7,82	-7,82	-11,33
5	Inferior	-9,80	-7,29	-7,29	-7,29	-7,29	-10,81
6	Superior	-10,35	-7,85	-7,85	-7,85	-7,85	-11,36
6	Inferior	-9,76	-7,26	-7,26	-7,26	-7,26	-10,77
7	Superior	-10,37	-7,87	-7,87	-7,87	-7,87	-11,37
7	Inferior	-9,73	-7,23	-7,23	-7,23	-7,23	-10,73
8	Superior	-10,37	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
8	Inferior	-9,70	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,70
9	Superior	-10,38	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
9	Inferior	-9,68	-7,19	-7,19	-7,19	-7,19	-10,68
10	Superior	-10,37	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,37
10	Inferior	-9,67	-7,18	-7,18	-7,18	-7,18	-10,67
11	Superior	-10,38	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
11	Inferior	-9,68	-7,19	-7,19	-7,19	-7,19	-10,68
12	Superior	-10,37	-7,88	-7,88	-7,88	-7,88	-11,38
12	Inferior	-9,70	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,70
13	Superior	-10,37	-7,87	-7,87	-7,87	-7,87	-11,37
13	Inferior	-9,73	-7,23	-7,23	-7,23	-7,23	-10,73
14	Superior	-10,35	-7,85	-7,85	-7,85	-7,85	-11,36
14	Inferior	-9,76	-7,26	-7,26	-7,26	-7,26	-10,77
15	Superior	-10,33	-7,82	-7,82	-7,82	-7,82	-11,33
15	Inferior	-9,80	-7,29	-7,29	-7,29	-7,29	-10,81
16	Superior	-10,30	-7,79	-7,79	-7,79	-7,79	-11,31
16	Inferior	-9,85	-7,34	-7,34	-7,34	-7,34	-10,86
17	Superior	-10,26	-7,75	-7,75	-7,75	-7,75	-11,27
17	Inferior	-9,90	-7,39	-7,39	-7,39	-7,39	-10,91
18	Superior	-10,22	-7,70	-7,70	-7,70	-7,70	-11,23
18	Inferior	-9,97	-7,45	-7,45	-7,45	-7,45	-10,97
19	Superior	-10,17	-7,65	-7,65	-7,65	-7,65	-11,18
19	Inferior	-10,03	-7,51	-7,51	-7,51	-7,51	-11,04

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=0,0\text{mm}$).txtTensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1
 Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1
 Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2
 Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx
 Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmín
 Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
20	Superior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12
20	Inferior	-10,11	-7,59	-7,59	-7,59	-7,59	-11,12

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Rara (CR)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CR): -18,62 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR): -18,62 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): -21,72 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 2,96 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): 3,55 MPa

Classificação Quanto ao Grau de Protensão (NBR-6118/2007)

Tipo de Concreto Estrutural	Exigências Relativas à Fissuração	Combinação de Ações em Serviço a Utilizar	Status da Verificação
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Combinação Frequente (CF)	Verificação não Necessária
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)	ELS-F	Combinação Frequente (CF)	Atendida
	ELS-D	Combinação Quase Permanente (CQP)	Atendida
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)	ELS-F	Combinação Rara (CR)	Atendida
	ELS-D	Combinação Frequente (CF)	Atendida

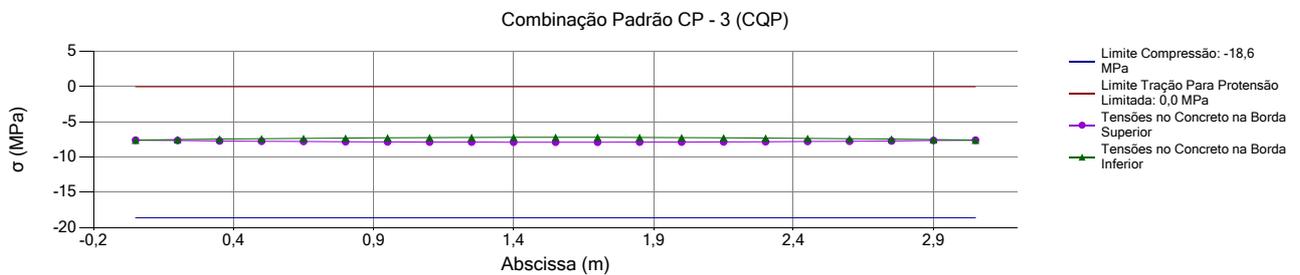
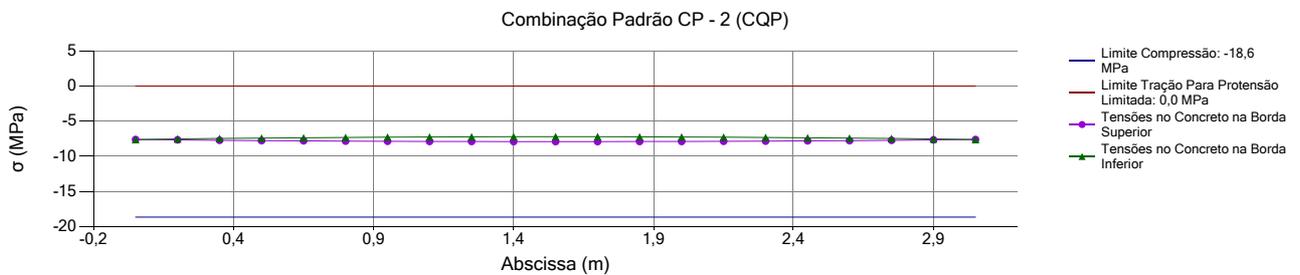
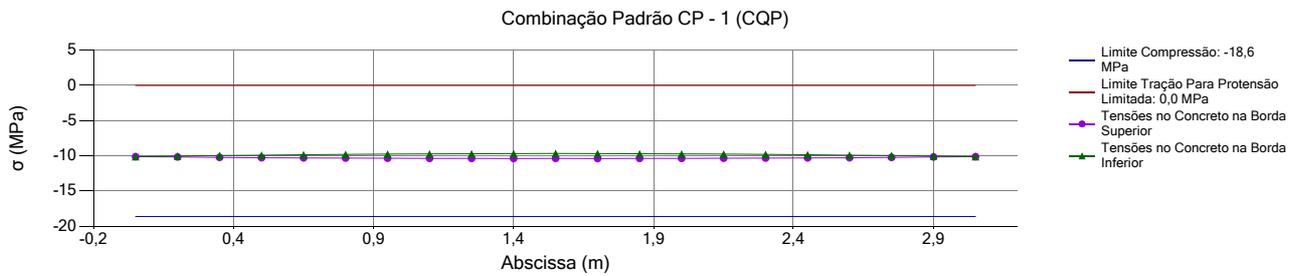
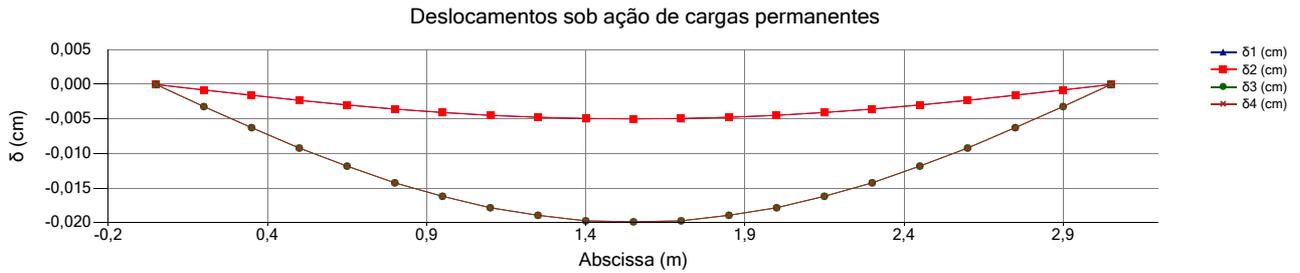
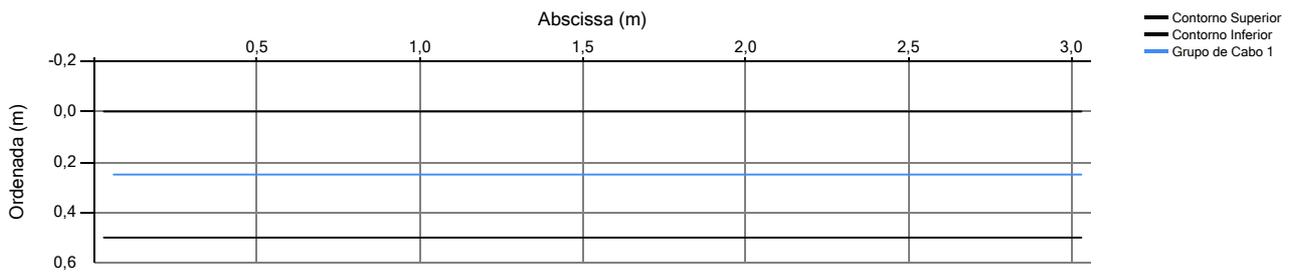
A estrutura atende aos requisitos prescritos pela NBR-6118/2007 para Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)
 e Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)

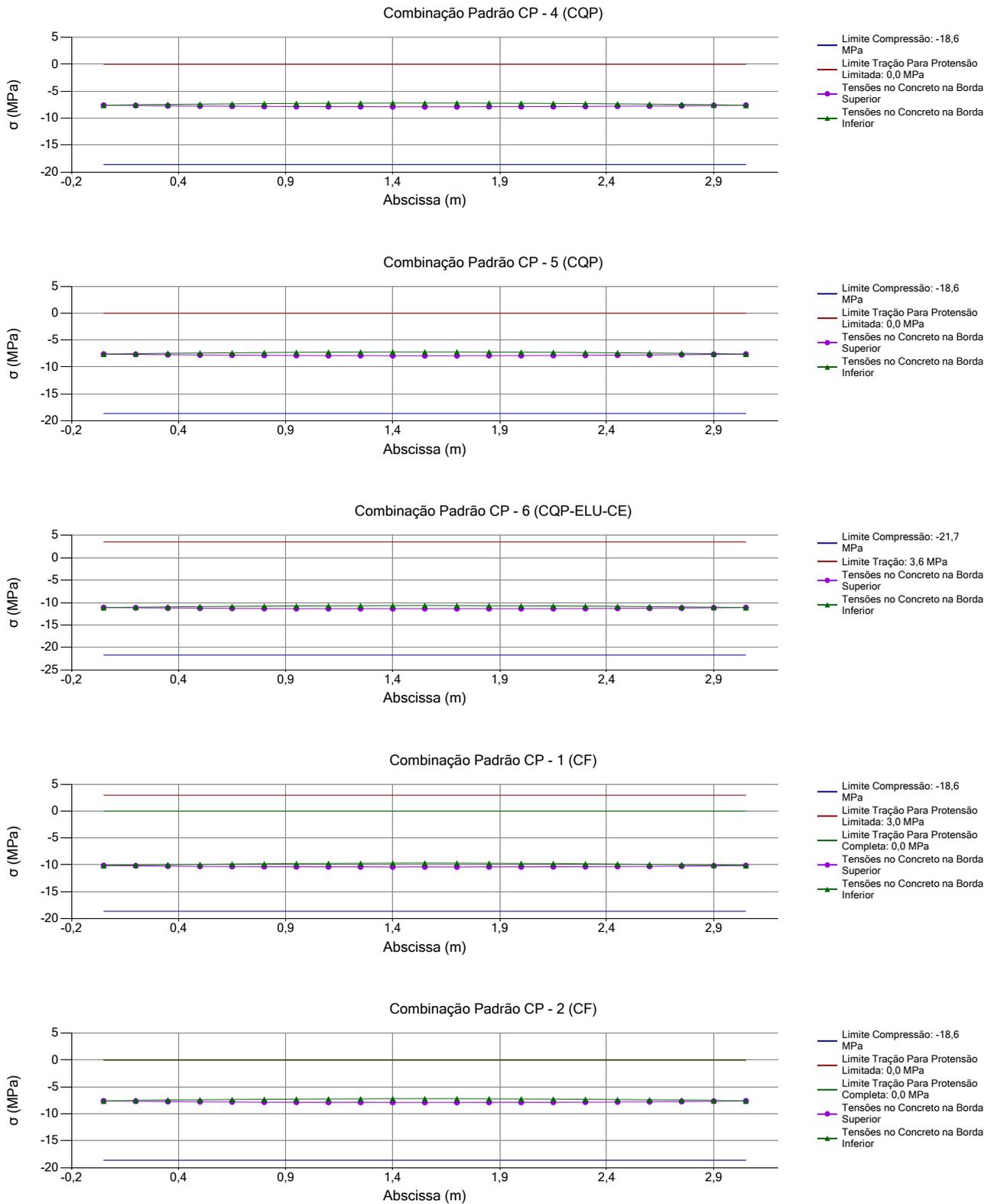
Deslocamentos sob Ação de Cargas Permanentes

Seção	δ_1 - Desl. Iniciais sem Prot. (cm)	δ_2 - Des. Iniciais com Prot. (cm)	δ_3 - Des. Finais sem Prot. (cm)	δ_4 - Des. Finais com Prot. (cm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	-0,01	-0,01
3	0,00	0,00	-0,01	-0,01
4	0,00	0,00	-0,01	-0,01
5	0,00	0,00	-0,01	-0,01
6	0,00	0,00	-0,02	-0,02
7	0,00	0,00	-0,02	-0,02
8	0,00	0,00	-0,02	-0,02
9	0,00	0,00	-0,02	-0,02
10	0,00	0,00	-0,02	-0,02
11	0,00	0,00	-0,02	-0,02
12	0,00	0,00	-0,02	-0,02
13	0,00	0,00	-0,02	-0,02
14	0,00	0,00	-0,02	-0,02
15	0,00	0,00	-0,01	-0,01
16	0,00	0,00	-0,01	-0,01
17	0,00	0,00	-0,01	-0,01
18	0,00	0,00	-0,01	-0,01
19	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

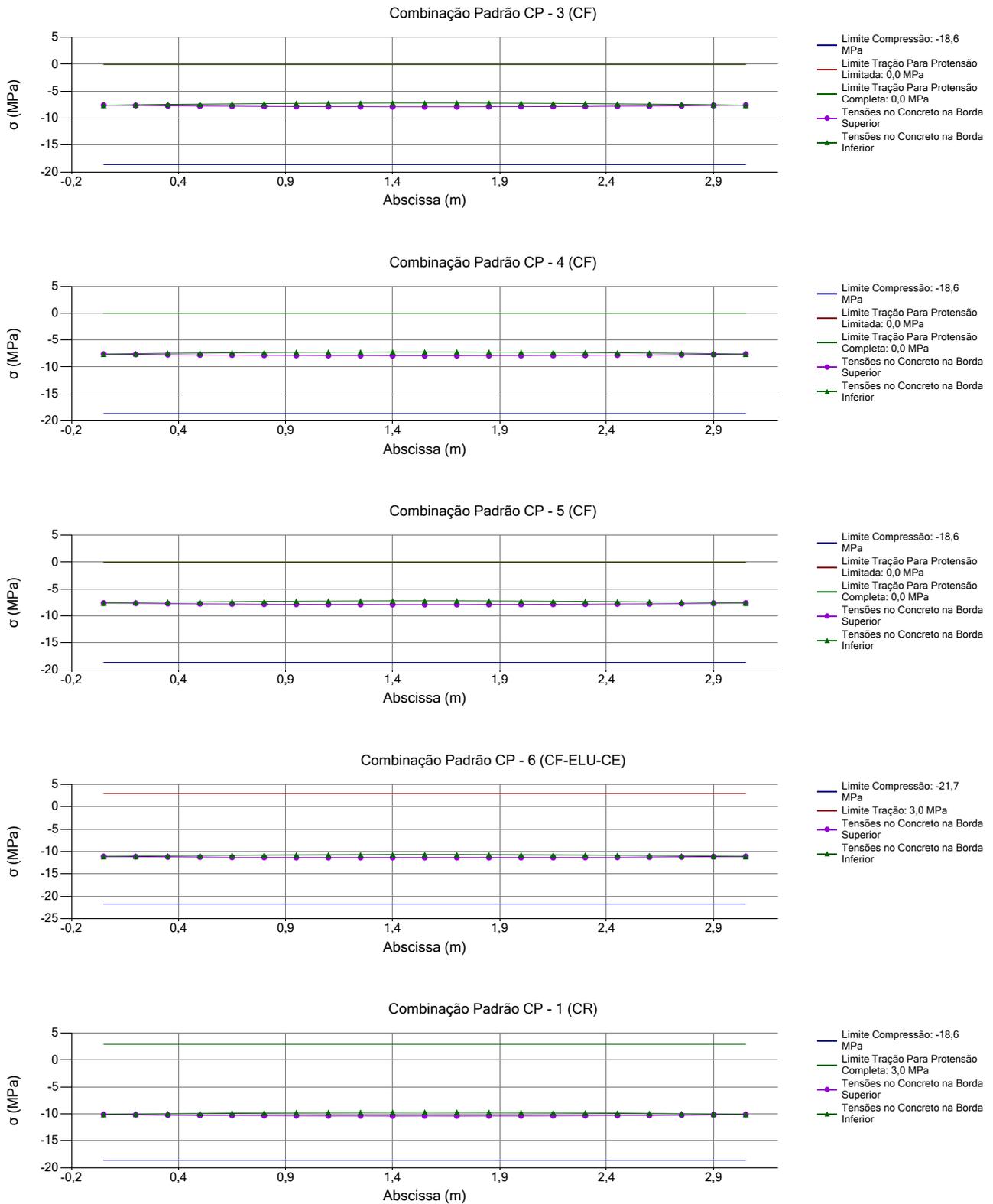
Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 (δ=0,0mm).txt

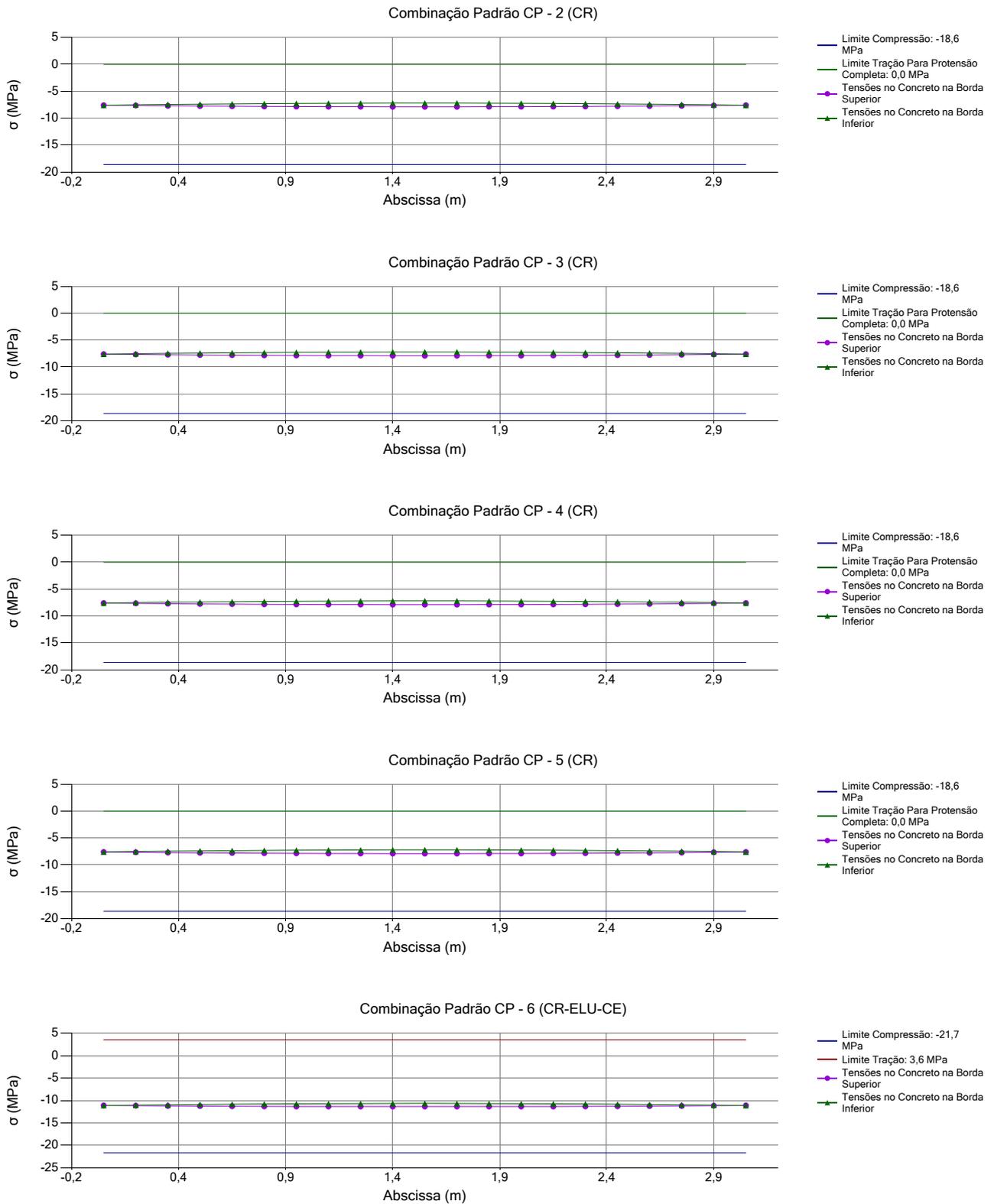




Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 (δ=0,0mm).txt





APÊNDICE D

RELATÓRIO DE CÁLCULO – VIGAS 1 E 2 – CASO 2

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,0\text{mm}$).txtDados Iniciais

Número de Apoios: 2

Número de Seções: 21

Número de Propriedades Geométricas: 1

Número de Grupos de Cabos de Protensão: 1

Número de Combinações Adicionais: 0

Tipo de Estrutura: Passarela de Pedestre

Apoios

Número do Apoio	Abcissa do Apoio	Nome do Apoio
1	0,000	Apoio-1
2	3,000	Apoio-2

Características Geométricas das Seções

Número da Seção	Abcissa (m)	Área (m ²)	Inércia (m ⁴)	Altura (m)	Ycg (m)	Perímetro (m)
0	0,000	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
1	0,150	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
2	0,300	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
3	0,450	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
4	0,600	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
5	0,750	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
6	0,900	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
7	1,050	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
8	1,200	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
9	1,350	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
10	1,500	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
11	1,650	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
12	1,800	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
13	1,950	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
14	2,100	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
15	2,250	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
16	2,400	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
17	2,550	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
18	2,700	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
19	2,850	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
20	3,000	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000

Envoltória de Momentos Fletores

Número da Seção	Mg-1 (KNm)	Mg-2 (KNm)	Mmáx (KNm)	Mmin (KNm)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	1,340	0,000	0,000	0,000
2	2,530	0,000	0,000	0,000
3	3,590	0,000	0,000	0,000
4	4,500	0,000	0,000	0,000
5	5,270	0,000	0,000	0,000
6	5,910	0,000	0,000	0,000
7	6,400	0,000	0,000	0,000
8	6,750	0,000	0,000	0,000
9	6,960	0,000	0,000	0,000
10	7,030	0,000	0,000	0,000
11	6,960	0,000	0,000	0,000
12	6,750	0,000	0,000	0,000
13	6,400	0,000	0,000	0,000
14	5,910	0,000	0,000	0,000
15	5,270	0,000	0,000	0,000
16	4,500	0,000	0,000	0,000
17	3,590	0,000	0,000	0,000
18	2,530	0,000	0,000	0,000
19	1,340	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
-----------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013
Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,0\text{mm}$).txt

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000

Dados de Protensão

Módulo de Elasticidade Longitudinal do Aço: 205.000,00 MPa
Resistência Característica à Tração do Aço (f_{ptk}): 1.670,00 MPa
Tipo de Cordoalhas: RB
Coeficiente de Atrito entre o Cabo e a Bainha: 0,30
Perda de Atrito por Metro: 0,60 % /m
Escorregamento na Ancoragem: 0,001 m
Umidade Relativa do Ar: 20,90 %
Temperatura Ambiente: 32,20 °C
Data da Protensão: 135,00 dias
Nome do Material do Aço de Protensão: Aço-1
Slump do Concreto: 12,00 cm
Data de Início da Cura do Concreto: 11,06 dias
Resistência Característica à Compressão do Concreto (f_{ck}): 31,03 MPa
Tipo de Cimento: CP-IV
Tempo de Análise: 10950 dias
Nome do Material Concreto: Concreto-1

Grupos de Cabos de Protensão
Grupo 1 - Prot-1

Área de Aço: 20,40 cm²
Número de Cabos: 1
Tensão Inicial: 1.239,00 MPa
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades
Desvio Angular Horizontal: 0,00°
Número de Pontos Notáveis: 2

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	0,25
2	3,00	0,25

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 1 - Prot-1

Área de Aço: 20,40 cm²

Número de Cabos: 1

Tensão Inicial: 1.239,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 0,00°

Ângulo no Final do Cabo: 0,00°

Variação Angular Vertical: 0,00°

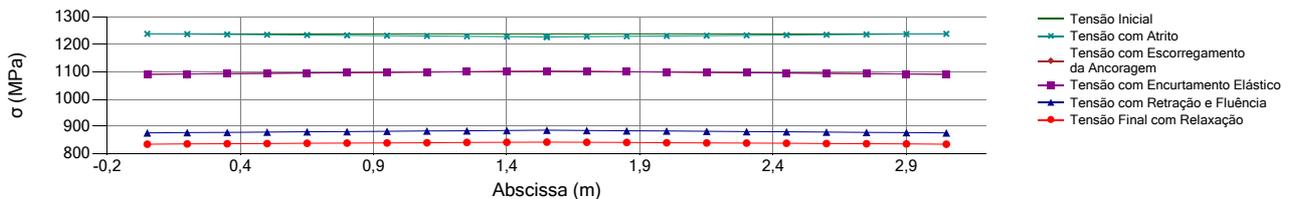
Comprimento da Projecção Horizontal do Cabo: 3,00 m

Comprimento Total do Cabo: 3,00 m

Alongamento do Cabo: 0,90 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 1,50 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
0	0,25	0,00	0,0	1.239,0	-147,8	0,0	1.091,2	-214,6	-41,1	835,5	32,6
1	0,25	0,00	-1,1	1.237,9	-145,6	0,0	1.092,3	-214,7	-41,4	836,2	32,5
2	0,25	0,00	-2,2	1.236,8	-143,4	0,0	1.093,4	-214,8	-41,6	837,0	32,4
3	0,25	0,00	-3,3	1.235,7	-141,1	0,0	1.094,5	-215,0	-41,9	837,7	32,4
4	0,25	0,00	-4,5	1.234,5	-138,9	0,0	1.095,6	-215,1	-42,1	838,4	32,3
5	0,25	0,00	-5,6	1.233,4	-136,7	0,0	1.096,8	-215,2	-42,4	839,2	32,3
6	0,25	0,00	-6,7	1.232,3	-134,4	0,0	1.097,9	-215,3	-42,6	839,9	32,2
7	0,25	0,00	-7,8	1.231,2	-132,2	0,0	1.099,0	-215,5	-42,9	840,6	32,2
8	0,25	0,00	-8,9	1.230,1	-130,0	0,0	1.100,1	-215,6	-43,2	841,3	32,1
9	0,25	0,00	-10,0	1.229,0	-127,7	0,0	1.101,2	-215,7	-43,4	842,1	32,0
10	0,25	0,00	-11,2	1.227,8	-125,5	0,0	1.102,3	-215,9	-43,7	842,8	32,0
11	0,25	0,00	-10,0	1.229,0	-127,7	0,0	1.101,2	-215,7	-43,4	842,1	32,0
12	0,25	0,00	-8,9	1.230,1	-130,0	0,0	1.100,1	-215,6	-43,2	841,3	32,1
13	0,25	0,00	-7,8	1.231,2	-132,2	0,0	1.099,0	-215,5	-42,9	840,6	32,2
14	0,25	0,00	-6,7	1.232,3	-134,4	0,0	1.097,9	-215,3	-42,6	839,9	32,2
15	0,25	0,00	-5,6	1.233,4	-136,7	0,0	1.096,8	-215,2	-42,4	839,2	32,3
16	0,25	0,00	-4,5	1.234,5	-138,9	0,0	1.095,6	-215,1	-42,1	838,4	32,3
17	0,25	0,00	-3,3	1.235,7	-141,1	0,0	1.094,5	-215,0	-41,9	837,7	32,4
18	0,25	0,00	-2,2	1.236,8	-143,4	0,0	1.093,4	-214,8	-41,6	837,0	32,4
19	0,25	0,00	-1,1	1.237,9	-145,6	0,0	1.092,3	-214,7	-41,4	836,2	32,5
20	0,25	0,00	0,0	1.239,0	-147,8	0,0	1.091,2	-214,6	-41,1	835,5	32,6



Esforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
0 esq.	-2.226,01	0,00	0,00	-	-
0 dir.	-2.226,01	0,00	0,00	-	-
1	-2.228,29	0,00	0,00	-	-
2	-2.230,56	0,00	0,00	-	-
3	-2.232,84	0,00	0,00	-	-
4	-2.235,11	0,00	0,00	-	-
5	-2.237,39	0,00	0,00	-	-
6	-2.239,66	0,00	0,00	-	-
7	-2.241,94	0,00	0,00	-	-
8	-2.244,21	0,00	0,00	-	-
9	-2.246,49	0,00	0,00	-	-
10	-2.248,76	0,00	0,00	-	-
11	-2.246,49	0,00	0,00	-	-
12	-2.244,21	0,00	0,00	-	-

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,0\text{mm}$).txtEsforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
13	-2.241,94	0,00	0,00	-	-
14	-2.239,66	0,00	0,00	-	-
15	-2.237,39	0,00	0,00	-	-
16	-2.235,11	0,00	0,00	-	-
17	-2.232,84	0,00	0,00	-	-
18	-2.230,56	0,00	0,00	-	-
19	-2.228,29	0,00	0,00	-	-
20 esq.	-2.226,01	0,00	0,00	-	-
20 dir.	-2.226,01	0,00	0,00	-	-

Reações Hiperestáticas Iniciais

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 2: -

Esforços Finais de Protensão

Seção	Nfp (KN)	Vfp (KN)	Mfp (KNm)	Vhfp (KN)	Mhfp (KNm)
0 esq.	-1.704,40	0,00	0,00	-	-
0 dir.	-1.704,40	0,00	0,00	-	-
1	-1.705,90	0,00	0,00	-	-
2	-1.707,39	0,00	0,00	-	-
3	-1.708,89	0,00	0,00	-	-
4	-1.710,38	0,00	0,00	-	-
5	-1.711,87	0,00	0,00	-	-
6	-1.713,37	0,00	0,00	-	-
7	-1.714,86	0,00	0,00	-	-
8	-1.716,35	0,00	0,00	-	-
9	-1.717,84	0,00	0,00	-	-
10	-1.719,33	0,00	0,00	-	-
11	-1.717,84	0,00	0,00	-	-
12	-1.716,35	0,00	0,00	-	-
13	-1.714,86	0,00	0,00	-	-
14	-1.713,37	0,00	0,00	-	-
15	-1.711,87	0,00	0,00	-	-
16	-1.710,38	0,00	0,00	-	-
17	-1.708,89	0,00	0,00	-	-
18	-1.707,39	0,00	0,00	-	-
19	-1.705,90	0,00	0,00	-	-
20 esq.	-1.704,40	0,00	0,00	-	-
20 dir.	-1.704,40	0,00	0,00	-	-

Reações Hiperestáticas Finais

Reação Hiperestática Final no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Final no Apoio 2: -

Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin

Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
0	Superior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79
0	Inferior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79
1	Superior	-8,98	-6,89	-6,89	-6,89	-6,89	-9,87
1	Inferior	-8,85	-6,76	-6,76	-6,76	-6,76	-9,74

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,0\text{mm}$).txtTensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin

Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
2	Superior	-9,05	-6,96	-6,96	-6,96	-6,96	-9,94
2	Inferior	-8,80	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,69
3	Superior	-9,11	-7,02	-7,02	-7,02	-7,02	-10,00
3	Inferior	-8,75	-6,66	-6,66	-6,66	-6,66	-9,64
4	Superior	-9,17	-7,07	-7,07	-7,07	-7,07	-10,06
4	Inferior	-8,72	-6,62	-6,62	-6,62	-6,62	-9,61
5	Superior	-9,21	-7,11	-7,11	-7,11	-7,11	-10,11
5	Inferior	-8,69	-6,58	-6,58	-6,58	-6,58	-9,58
6	Superior	-9,25	-7,15	-7,15	-7,15	-7,15	-10,15
6	Inferior	-8,66	-6,56	-6,56	-6,56	-6,56	-9,56
7	Superior	-9,29	-7,18	-7,18	-7,18	-7,18	-10,18
7	Inferior	-8,65	-6,54	-6,54	-6,54	-6,54	-9,54
8	Superior	-9,31	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,21
8	Inferior	-8,64	-6,53	-6,53	-6,53	-6,53	-9,54
9	Superior	-9,33	-7,22	-7,22	-7,22	-7,22	-10,23
9	Inferior	-8,64	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,54
10	Superior	-9,35	-7,23	-7,23	-7,23	-7,23	-10,25
10	Inferior	-8,64	-6,53	-6,53	-6,53	-6,53	-9,54
11	Superior	-9,33	-7,22	-7,22	-7,22	-7,22	-10,23
11	Inferior	-8,64	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,54
12	Superior	-9,31	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,21
12	Inferior	-8,64	-6,53	-6,53	-6,53	-6,53	-9,54
13	Superior	-9,29	-7,18	-7,18	-7,18	-7,18	-10,18
13	Inferior	-8,65	-6,54	-6,54	-6,54	-6,54	-9,54
14	Superior	-9,25	-7,15	-7,15	-7,15	-7,15	-10,15
14	Inferior	-8,66	-6,56	-6,56	-6,56	-6,56	-9,56
15	Superior	-9,21	-7,11	-7,11	-7,11	-7,11	-10,11
15	Inferior	-8,69	-6,58	-6,58	-6,58	-6,58	-9,58
16	Superior	-9,17	-7,07	-7,07	-7,07	-7,07	-10,06
16	Inferior	-8,72	-6,62	-6,62	-6,62	-6,62	-9,61
17	Superior	-9,11	-7,02	-7,02	-7,02	-7,02	-10,00
17	Inferior	-8,75	-6,66	-6,66	-6,66	-6,66	-9,64
18	Superior	-9,05	-6,96	-6,96	-6,96	-6,96	-9,94
18	Inferior	-8,80	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,69
19	Superior	-8,98	-6,89	-6,89	-6,89	-6,89	-9,87
19	Inferior	-8,85	-6,76	-6,76	-6,76	-6,76	-9,74
20	Superior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79
20	Inferior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente (CQP)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CQP): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): -21,72 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): 3,55 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CF): Efp + Hfp + Mg1

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,0\text{mm}$).txt

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): $1.1 \cdot E_{ip} + 1.1 \cdot H_{ip} + Mg_1$ Combinação Padrão 2 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1$ Combinação Padrão 3 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1 + Mg_2$ Combinação Padrão 4 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1 + Mg_2 + 0,4 \cdot M_{\text{máx}}$ Combinação Padrão 5 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1 + Mg_2 + 0,4 \cdot M_{\text{mín}}$ Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): $1.1 \cdot E_{ip} + 1.1 \cdot H_{ip} + Mg_1$

Seção	Borda	CP-1 (CF)	CP-2 (CF)	CP-3 (CF)	CP-4 (CF)	CP-5 (CF)	CP-6 (CF-ELU-CE)
0	Superior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79
0	Inferior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79
1	Superior	-8,98	-6,89	-6,89	-6,89	-6,89	-9,87
1	Inferior	-8,85	-6,76	-6,76	-6,76	-6,76	-9,74
2	Superior	-9,05	-6,96	-6,96	-6,96	-6,96	-9,94
2	Inferior	-8,80	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,69
3	Superior	-9,11	-7,02	-7,02	-7,02	-7,02	-10,00
3	Inferior	-8,75	-6,66	-6,66	-6,66	-6,66	-9,64
4	Superior	-9,17	-7,07	-7,07	-7,07	-7,07	-10,06
4	Inferior	-8,72	-6,62	-6,62	-6,62	-6,62	-9,61
5	Superior	-9,21	-7,11	-7,11	-7,11	-7,11	-10,11
5	Inferior	-8,69	-6,58	-6,58	-6,58	-6,58	-9,58
6	Superior	-9,25	-7,15	-7,15	-7,15	-7,15	-10,15
6	Inferior	-8,66	-6,56	-6,56	-6,56	-6,56	-9,56
7	Superior	-9,29	-7,18	-7,18	-7,18	-7,18	-10,18
7	Inferior	-8,65	-6,54	-6,54	-6,54	-6,54	-9,54
8	Superior	-9,31	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,21
8	Inferior	-8,64	-6,53	-6,53	-6,53	-6,53	-9,54
9	Superior	-9,33	-7,22	-7,22	-7,22	-7,22	-10,23
9	Inferior	-8,64	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,54
10	Superior	-9,35	-7,23	-7,23	-7,23	-7,23	-10,25
10	Inferior	-8,64	-6,53	-6,53	-6,53	-6,53	-9,54
11	Superior	-9,33	-7,22	-7,22	-7,22	-7,22	-10,23
11	Inferior	-8,64	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,54
12	Superior	-9,31	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,21
12	Inferior	-8,64	-6,53	-6,53	-6,53	-6,53	-9,54
13	Superior	-9,29	-7,18	-7,18	-7,18	-7,18	-10,18
13	Inferior	-8,65	-6,54	-6,54	-6,54	-6,54	-9,54
14	Superior	-9,25	-7,15	-7,15	-7,15	-7,15	-10,15
14	Inferior	-8,66	-6,56	-6,56	-6,56	-6,56	-9,56
15	Superior	-9,21	-7,11	-7,11	-7,11	-7,11	-10,11
15	Inferior	-8,69	-6,58	-6,58	-6,58	-6,58	-9,58
16	Superior	-9,17	-7,07	-7,07	-7,07	-7,07	-10,06
16	Inferior	-8,72	-6,62	-6,62	-6,62	-6,62	-9,61
17	Superior	-9,11	-7,02	-7,02	-7,02	-7,02	-10,00
17	Inferior	-8,75	-6,66	-6,66	-6,66	-6,66	-9,64
18	Superior	-9,05	-6,96	-6,96	-6,96	-6,96	-9,94
18	Inferior	-8,80	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,69
19	Superior	-8,98	-6,89	-6,89	-6,89	-6,89	-9,87
19	Inferior	-8,85	-6,76	-6,76	-6,76	-6,76	-9,74
20	Superior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79
20	Inferior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Frequente (CF)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): -21,72 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 2,96 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,0\text{mm}$).txtLimite de Tensões nas Seções - Combinação Frequente (CF)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): -21,72 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 2,96 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): 3,55 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx

Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmin

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
0	Superior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79
0	Inferior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79
1	Superior	-8,98	-6,89	-6,89	-6,89	-6,89	-9,87
1	Inferior	-8,85	-6,76	-6,76	-6,76	-6,76	-9,74
2	Superior	-9,05	-6,96	-6,96	-6,96	-6,96	-9,94
2	Inferior	-8,80	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,69
3	Superior	-9,11	-7,02	-7,02	-7,02	-7,02	-10,00
3	Inferior	-8,75	-6,66	-6,66	-6,66	-6,66	-9,64
4	Superior	-9,17	-7,07	-7,07	-7,07	-7,07	-10,06
4	Inferior	-8,72	-6,62	-6,62	-6,62	-6,62	-9,61
5	Superior	-9,21	-7,11	-7,11	-7,11	-7,11	-10,11
5	Inferior	-8,69	-6,58	-6,58	-6,58	-6,58	-9,58
6	Superior	-9,25	-7,15	-7,15	-7,15	-7,15	-10,15
6	Inferior	-8,66	-6,56	-6,56	-6,56	-6,56	-9,56
7	Superior	-9,29	-7,18	-7,18	-7,18	-7,18	-10,18
7	Inferior	-8,65	-6,54	-6,54	-6,54	-6,54	-9,54
8	Superior	-9,31	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,21
8	Inferior	-8,64	-6,53	-6,53	-6,53	-6,53	-9,54
9	Superior	-9,33	-7,22	-7,22	-7,22	-7,22	-10,23
9	Inferior	-8,64	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,54
10	Superior	-9,35	-7,23	-7,23	-7,23	-7,23	-10,25
10	Inferior	-8,64	-6,53	-6,53	-6,53	-6,53	-9,54
11	Superior	-9,33	-7,22	-7,22	-7,22	-7,22	-10,23
11	Inferior	-8,64	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,54
12	Superior	-9,31	-7,20	-7,20	-7,20	-7,20	-10,21
12	Inferior	-8,64	-6,53	-6,53	-6,53	-6,53	-9,54
13	Superior	-9,29	-7,18	-7,18	-7,18	-7,18	-10,18
13	Inferior	-8,65	-6,54	-6,54	-6,54	-6,54	-9,54
14	Superior	-9,25	-7,15	-7,15	-7,15	-7,15	-10,15
14	Inferior	-8,66	-6,56	-6,56	-6,56	-6,56	-9,56
15	Superior	-9,21	-7,11	-7,11	-7,11	-7,11	-10,11
15	Inferior	-8,69	-6,58	-6,58	-6,58	-6,58	-9,58
16	Superior	-9,17	-7,07	-7,07	-7,07	-7,07	-10,06
16	Inferior	-8,72	-6,62	-6,62	-6,62	-6,62	-9,61
17	Superior	-9,11	-7,02	-7,02	-7,02	-7,02	-10,00
17	Inferior	-8,75	-6,66	-6,66	-6,66	-6,66	-9,64
18	Superior	-9,05	-6,96	-6,96	-6,96	-6,96	-9,94
18	Inferior	-8,80	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,69
19	Superior	-8,98	-6,89	-6,89	-6,89	-6,89	-9,87
19	Inferior	-8,85	-6,76	-6,76	-6,76	-6,76	-9,74

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,0\text{mm}$).txt

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1
 Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1
 Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2
 Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx
 Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmín
 Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
20	Superior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79
20	Inferior	-8,90	-6,82	-6,82	-6,82	-6,82	-9,79

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Rara (CR)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CR): -18,62 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR): -18,62 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): -21,72 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 2,96 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): 3,55 MPa

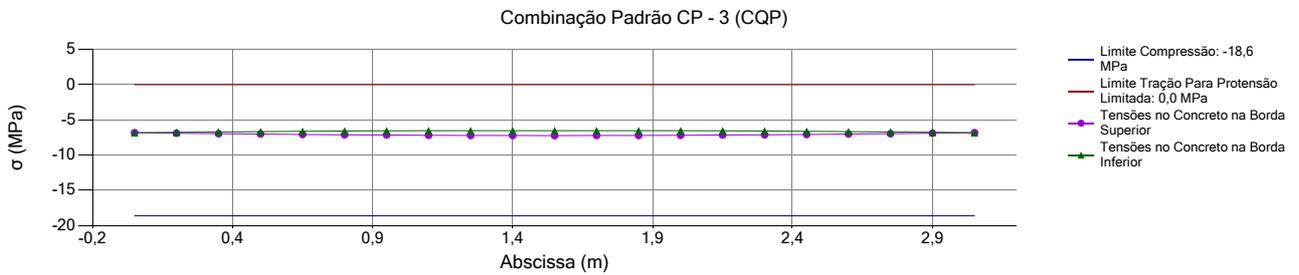
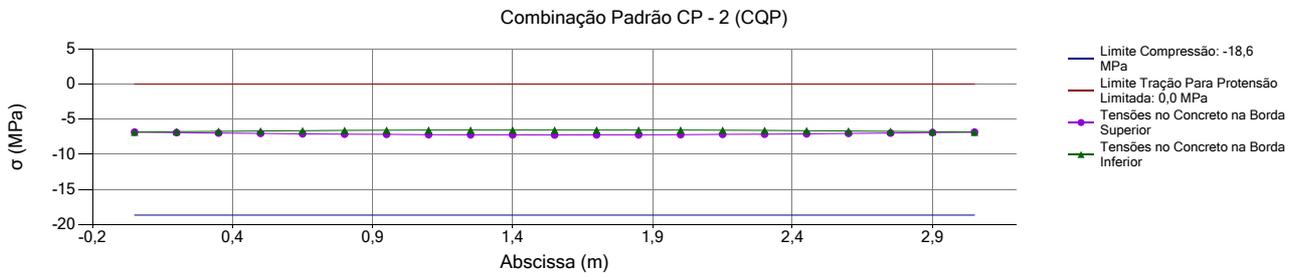
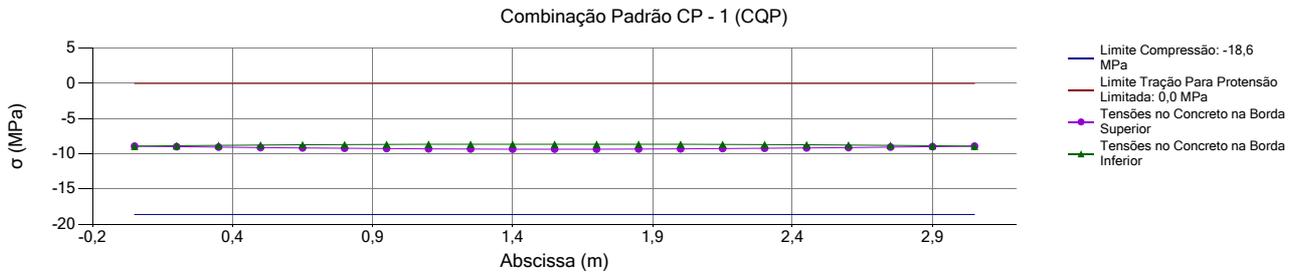
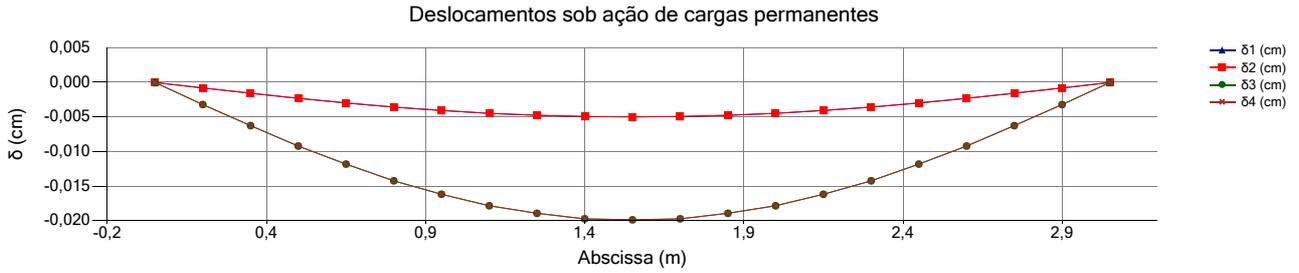
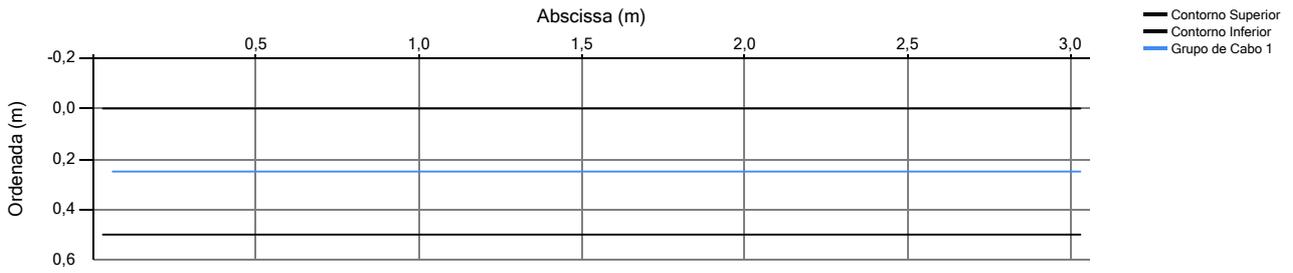
Classificação Quanto ao Grau de Protensão (NBR-6118/2007)

Tipo de Concreto Estrutural	Exigências Relativas à Fissuração	Combinação de Ações em Serviço a Utilizar	Status da Verificação
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Combinação Frequente (CF)	Verificação não Necessária
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)	ELS-F	Combinação Frequente (CF)	Atendida
	ELS-D	Combinação Quase Permanente (CQP)	Atendida
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)	ELS-F	Combinação Rara (CR)	Atendida
	ELS-D	Combinação Frequente (CF)	Atendida

A estrutura atende aos requisitos prescritos pela NBR-6118/2007 para Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada) e Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)

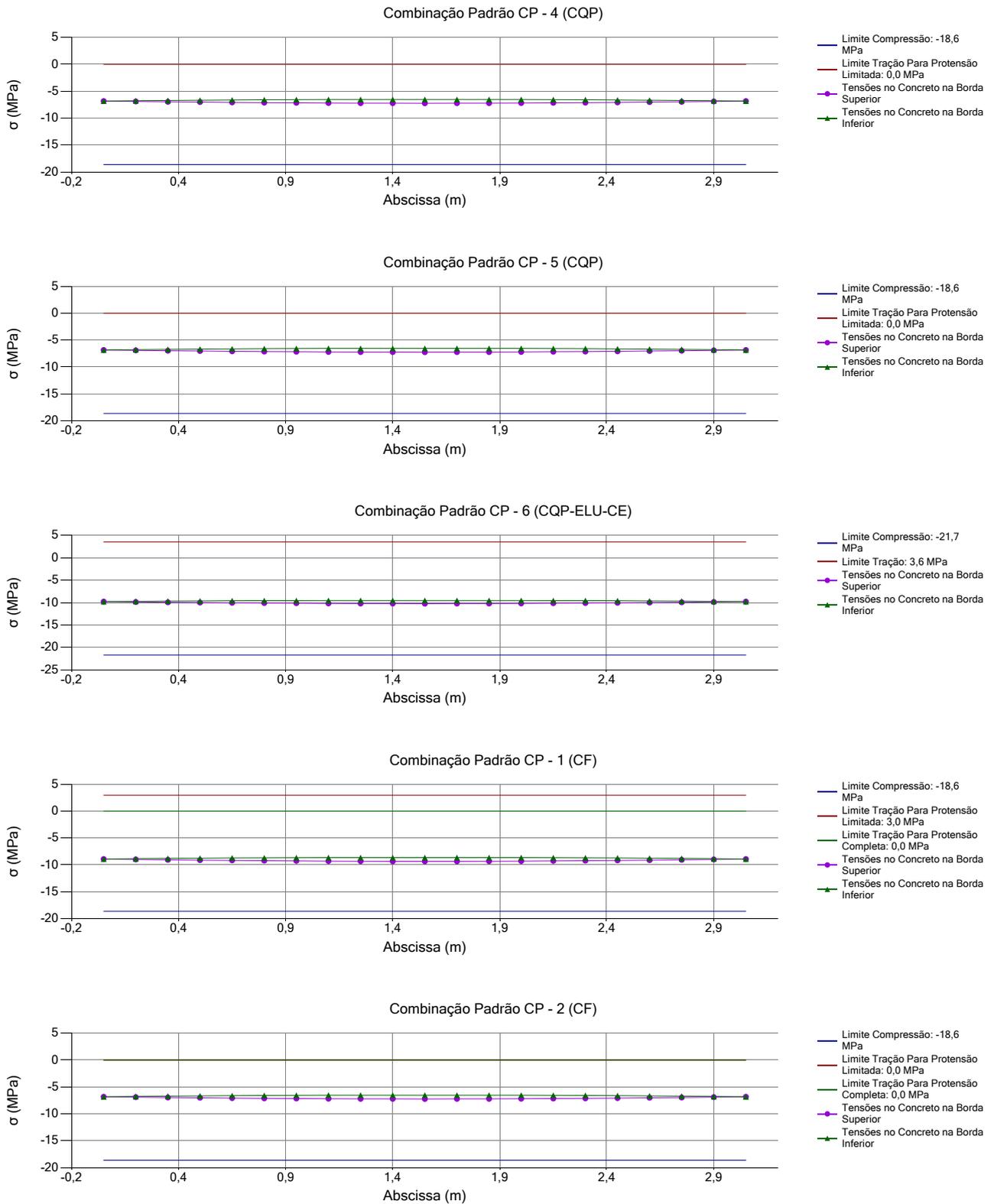
Deslocamentos sob Ação de Cargas Permanentes

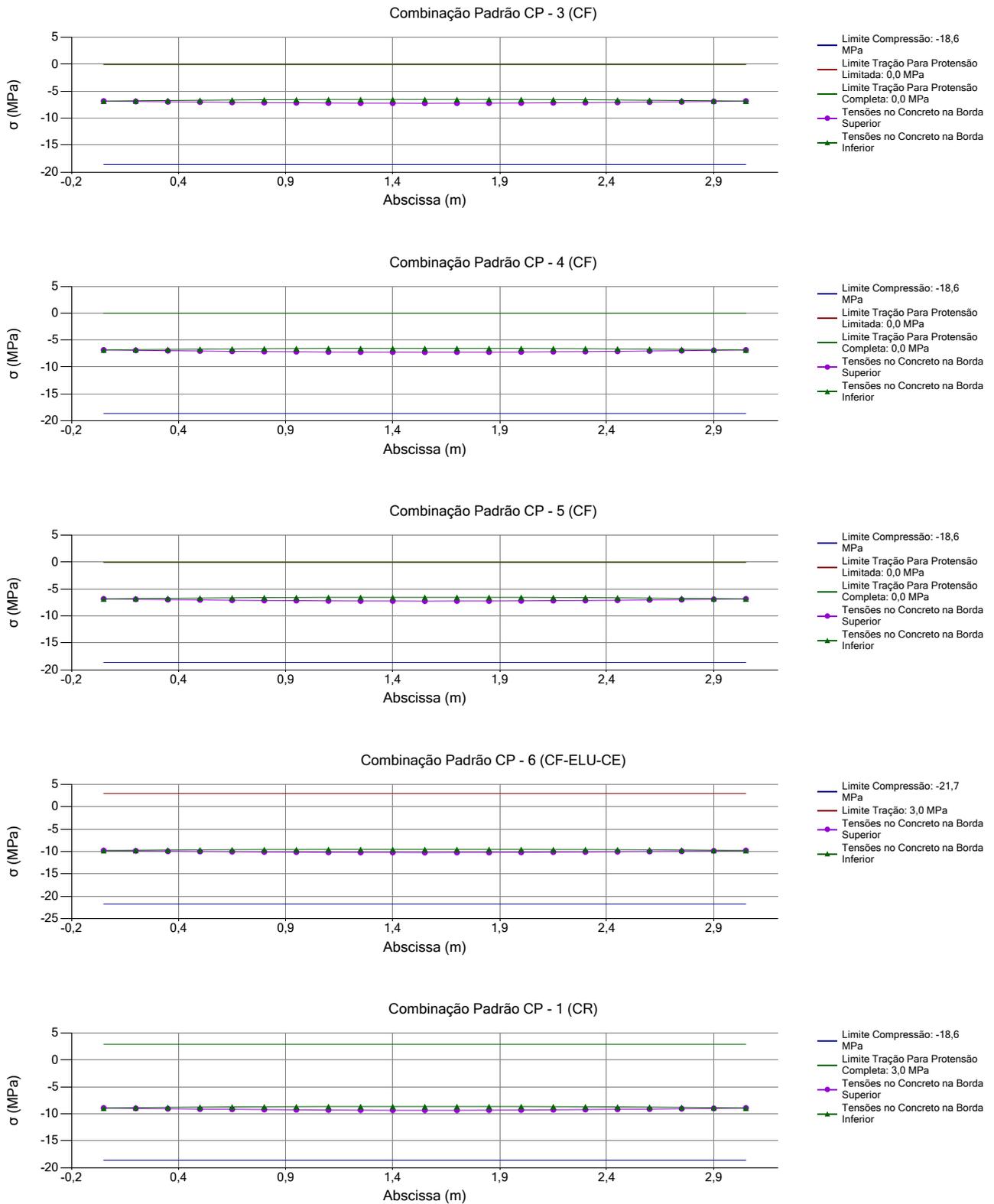
Seção	δ_1 - Desl. Iniciais sem Prot. (cm)	δ_2 - Des. Iniciais com Prot. (cm)	δ_3 - Des. Finais sem Prot. (cm)	δ_4 - Des. Finais com Prot. (cm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	-0,01	-0,01
3	0,00	0,00	-0,01	-0,01
4	0,00	0,00	-0,01	-0,01
5	0,00	0,00	-0,01	-0,01
6	0,00	0,00	-0,02	-0,02
7	0,00	0,00	-0,02	-0,02
8	0,00	0,00	-0,02	-0,02
9	0,00	0,00	-0,02	-0,02
10	0,00	0,00	-0,02	-0,02
11	0,00	0,00	-0,02	-0,02
12	0,00	0,00	-0,02	-0,02
13	0,00	0,00	-0,02	-0,02
14	0,00	0,00	-0,02	-0,02
15	0,00	0,00	-0,01	-0,01
16	0,00	0,00	-0,01	-0,01
17	0,00	0,00	-0,01	-0,01
18	0,00	0,00	-0,01	-0,01
19	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00

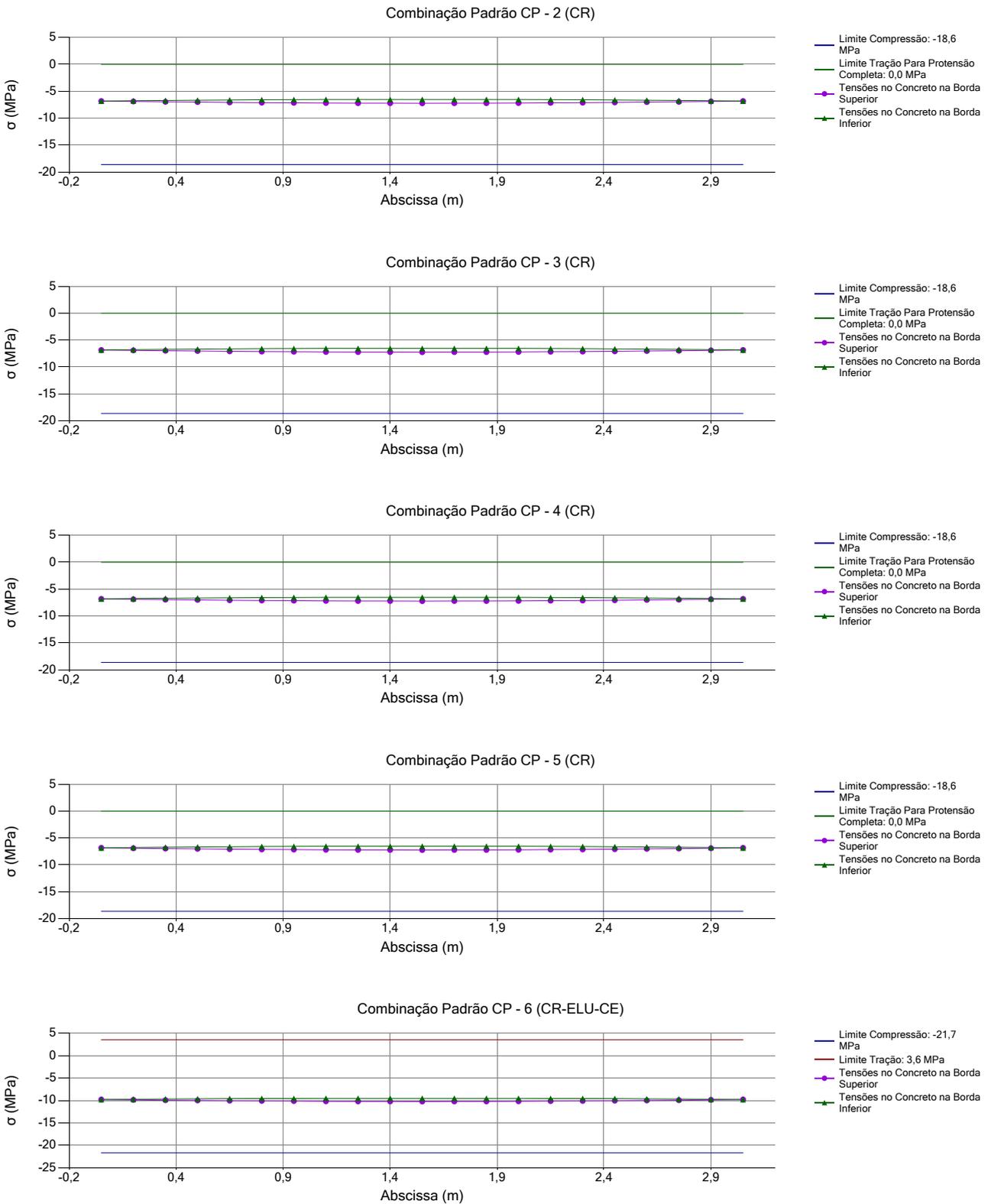


Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 (δ=1,0mm).txt







APÊNDICE E

RELATÓRIO DE CÁLCULO – VIGAS 1 E 2 – CASO 3

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,5\text{mm}$).txtDados Iniciais

Número de Apoios: 2

Número de Seções: 21

Número de Propriedades Geométricas: 1

Número de Grupos de Cabos de Protensão: 1

Número de Combinações Adicionais: 0

Tipo de Estrutura: Passarela de Pedestre

Apoios

Número do Apoio	Abcissa do Apoio	Nome do Apoio
1	0,000	Apoio-1
2	3,000	Apoio-2

Características Geométricas das Seções

Número da Seção	Abcissa (m)	Área (m ²)	Inércia (m ⁴)	Altura (m)	Ycg (m)	Perímetro (m)
0	0,000	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
1	0,150	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
2	0,300	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
3	0,450	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
4	0,600	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
5	0,750	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
6	0,900	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
7	1,050	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
8	1,200	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
9	1,350	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
10	1,500	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
11	1,650	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
12	1,800	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
13	1,950	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
14	2,100	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
15	2,250	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
16	2,400	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
17	2,550	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
18	2,700	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
19	2,850	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000
20	3,000	0,250	0,005	0,500	0,250	2,000

Envoltória de Momentos Fletores

Número da Seção	Mg-1 (KNm)	Mg-2 (KNm)	Mmáx (KNm)	Mmin (KNm)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	1,340	0,000	0,000	0,000
2	2,530	0,000	0,000	0,000
3	3,590	0,000	0,000	0,000
4	4,500	0,000	0,000	0,000
5	5,270	0,000	0,000	0,000
6	5,910	0,000	0,000	0,000
7	6,400	0,000	0,000	0,000
8	6,750	0,000	0,000	0,000
9	6,960	0,000	0,000	0,000
10	7,030	0,000	0,000	0,000
11	6,960	0,000	0,000	0,000
12	6,750	0,000	0,000	0,000
13	6,400	0,000	0,000	0,000
14	5,910	0,000	0,000	0,000
15	5,270	0,000	0,000	0,000
16	4,500	0,000	0,000	0,000
17	3,590	0,000	0,000	0,000
18	2,530	0,000	0,000	0,000
19	1,340	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
-----------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,000	0,000

Dados de Protensão

Módulo de Elasticidade Longitudinal do Aço: 205.000,00 MPa
 Resistência Característica à Tração do Aço (f_{ptk}): 1.670,00 MPa
 Tipo de Cordoalhas: RB
 Coeficiente de Atrito entre o Cabo e a Bainha: 0,30
 Perda de Atrito por Metro: 0,60 % /m
 Escorregamento na Ancoragem: 0,002 m
 Umidade Relativa do Ar: 20,90 %
 Temperatura Ambiente: 32,20 °C
 Data da Protensão: 135,00 dias
 Nome do Material do Aço de Protensão: Aço-1
 Slump do Concreto: 12,00 cm
 Data de Início da Cura do Concreto: 11,06 dias
 Resistência Característica à Compressão do Concreto (f_{ck}): 31,03 MPa
 Tipo de Cimento: CP-IV
 Tempo de Análise: 10950 dias
 Nome do Material Concreto: Concreto-1

Grupos de Cabos de ProtensãoGrupo 1 - Prot-1

Área de Aço: 20,40 cm²
 Número de Cabos: 1
 Tensão Inicial: 1.239,00 MPa
 Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades
 Desvio Angular Horizontal: 0,00°
 Número de Pontos Notáveis: 2

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	0,25
2	3,00	0,25

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,5\text{mm}$).txt

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 1 - Prot-1

Área de Aço: 20,40 cm²

Número de Cabos: 1

Tensão Inicial: 1.239,00 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 0,00°

Ângulo no Final do Cabo: 0,00°

Variação Angular Vertical: 0,00°

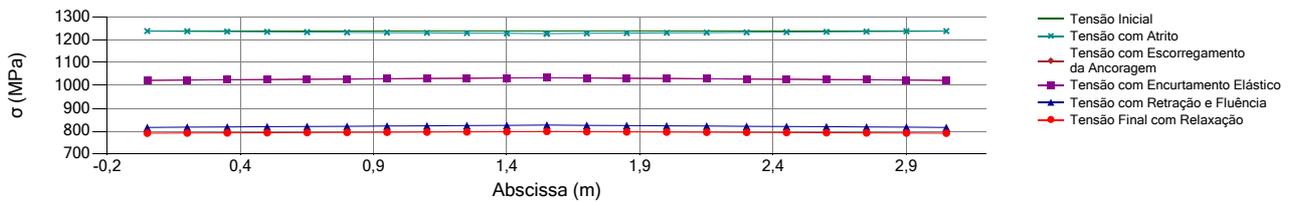
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 3,00 m

Comprimento Total do Cabo: 3,00 m

Alongamento do Cabo: 0,90 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 1,50 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
0	0,25	0,00	0,0	1.239,0	-216,2	0,0	1.022,8	-206,7	-25,6	790,6	36,2
1	0,25	0,00	-1,1	1.237,9	-213,9	0,0	1.024,0	-206,8	-25,8	791,3	36,1
2	0,25	0,00	-2,2	1.236,8	-211,7	0,0	1.025,1	-207,0	-26,1	792,0	36,1
3	0,25	0,00	-3,3	1.235,7	-209,5	0,0	1.026,2	-207,1	-26,3	792,8	36,0
4	0,25	0,00	-4,5	1.234,5	-207,2	0,0	1.027,3	-207,2	-26,5	793,5	36,0
5	0,25	0,00	-5,6	1.233,4	-205,0	0,0	1.028,4	-207,4	-26,8	794,3	35,9
6	0,25	0,00	-6,7	1.232,3	-202,8	0,0	1.029,5	-207,5	-27,0	795,0	35,8
7	0,25	0,00	-7,8	1.231,2	-200,5	0,0	1.030,7	-207,6	-27,3	795,7	35,8
8	0,25	0,00	-8,9	1.230,1	-198,3	0,0	1.031,8	-207,8	-27,5	796,5	35,7
9	0,25	0,00	-10,0	1.229,0	-196,1	0,0	1.032,9	-207,9	-27,8	797,2	35,7
10	0,25	0,00	-11,2	1.227,8	-193,8	0,0	1.034,0	-208,0	-28,0	798,0	35,6
11	0,25	0,00	-10,0	1.229,0	-196,1	0,0	1.032,9	-207,9	-27,8	797,2	35,7
12	0,25	0,00	-8,9	1.230,1	-198,3	0,0	1.031,8	-207,8	-27,5	796,5	35,7
13	0,25	0,00	-7,8	1.231,2	-200,5	0,0	1.030,7	-207,6	-27,3	795,7	35,8
14	0,25	0,00	-6,7	1.232,3	-202,8	0,0	1.029,5	-207,5	-27,0	795,0	35,8
15	0,25	0,00	-5,6	1.233,4	-205,0	0,0	1.028,4	-207,4	-26,8	794,3	35,9
16	0,25	0,00	-4,5	1.234,5	-207,2	0,0	1.027,3	-207,2	-26,5	793,5	36,0
17	0,25	0,00	-3,3	1.235,7	-209,5	0,0	1.026,2	-207,1	-26,3	792,8	36,0
18	0,25	0,00	-2,2	1.236,8	-211,7	0,0	1.025,1	-207,0	-26,1	792,0	36,1
19	0,25	0,00	-1,1	1.237,9	-213,9	0,0	1.024,0	-206,8	-25,8	791,3	36,1
20	0,25	0,00	0,0	1.239,0	-216,2	0,0	1.022,8	-206,7	-25,6	790,6	36,2



Esforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
0 esq.	-2.086,61	0,00	0,00	-	-
0 dir.	-2.086,61	0,00	0,00	-	-
1	-2.088,89	0,00	0,00	-	-
2	-2.091,16	0,00	0,00	-	-
3	-2.093,44	0,00	0,00	-	-
4	-2.095,71	0,00	0,00	-	-
5	-2.097,99	0,00	0,00	-	-
6	-2.100,26	0,00	0,00	-	-
7	-2.102,54	0,00	0,00	-	-
8	-2.104,81	0,00	0,00	-	-
9	-2.107,09	0,00	0,00	-	-
10	-2.109,36	0,00	0,00	-	-
11	-2.107,09	0,00	0,00	-	-
12	-2.104,81	0,00	0,00	-	-

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,5\text{mm}$).txtEsforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
13	-2.102,54	0,00	0,00	-	-
14	-2.100,26	0,00	0,00	-	-
15	-2.097,99	0,00	0,00	-	-
16	-2.095,71	0,00	0,00	-	-
17	-2.093,44	0,00	0,00	-	-
18	-2.091,16	0,00	0,00	-	-
19	-2.088,89	0,00	0,00	-	-
20 esq.	-2.086,61	0,00	0,00	-	-
20 dir.	-2.086,61	0,00	0,00	-	-

Reações Hiperestáticas Iniciais

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 2: -

Esforços Finais de Protensão

Seção	Nfp (KN)	Vfp (KN)	Mfp (KNm)	Vhfp (KN)	Mhfp (KNm)
0 esq.	-1.612,75	0,00	0,00	-	-
0 dir.	-1.612,75	0,00	0,00	-	-
1	-1.614,26	0,00	0,00	-	-
2	-1.615,78	0,00	0,00	-	-
3	-1.617,29	0,00	0,00	-	-
4	-1.618,80	0,00	0,00	-	-
5	-1.620,31	0,00	0,00	-	-
6	-1.621,82	0,00	0,00	-	-
7	-1.623,32	0,00	0,00	-	-
8	-1.624,83	0,00	0,00	-	-
9	-1.626,34	0,00	0,00	-	-
10	-1.627,84	0,00	0,00	-	-
11	-1.626,34	0,00	0,00	-	-
12	-1.624,83	0,00	0,00	-	-
13	-1.623,32	0,00	0,00	-	-
14	-1.621,82	0,00	0,00	-	-
15	-1.620,31	0,00	0,00	-	-
16	-1.618,80	0,00	0,00	-	-
17	-1.617,29	0,00	0,00	-	-
18	-1.615,78	0,00	0,00	-	-
19	-1.614,26	0,00	0,00	-	-
20 esq.	-1.612,75	0,00	0,00	-	-
20 dir.	-1.612,75	0,00	0,00	-	-

Reações Hiperestáticas Finais

Reação Hiperestática Final no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Final no Apoio 2: -

Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin

Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
0	Superior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18
0	Inferior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18
1	Superior	-8,42	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,26
1	Inferior	-8,29	-6,39	-6,39	-6,39	-6,39	-9,12

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,5\text{mm}$).txt

Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin

Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
2	Superior	-8,49	-6,59	-6,59	-6,59	-6,59	-9,33
2	Inferior	-8,24	-6,34	-6,34	-6,34	-6,34	-9,07
3	Superior	-8,55	-6,65	-6,65	-6,65	-6,65	-9,39
3	Inferior	-8,19	-6,29	-6,29	-6,29	-6,29	-9,03
4	Superior	-8,61	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,45
4	Inferior	-8,16	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-9,00
5	Superior	-8,66	-6,74	-6,74	-6,74	-6,74	-9,49
5	Inferior	-8,13	-6,22	-6,22	-6,22	-6,22	-8,97
6	Superior	-8,70	-6,78	-6,78	-6,78	-6,78	-9,54
6	Inferior	-8,11	-6,19	-6,19	-6,19	-6,19	-8,95
7	Superior	-8,73	-6,81	-6,81	-6,81	-6,81	-9,57
7	Inferior	-8,09	-6,17	-6,17	-6,17	-6,17	-8,93
8	Superior	-8,76	-6,84	-6,84	-6,84	-6,84	-9,60
8	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
9	Superior	-8,78	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	-9,62
9	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
10	Superior	-8,79	-6,86	-6,86	-6,86	-6,86	-9,63
10	Inferior	-8,09	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,93
11	Superior	-8,78	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	-9,62
11	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
12	Superior	-8,76	-6,84	-6,84	-6,84	-6,84	-9,60
12	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
13	Superior	-8,73	-6,81	-6,81	-6,81	-6,81	-9,57
13	Inferior	-8,09	-6,17	-6,17	-6,17	-6,17	-8,93
14	Superior	-8,70	-6,78	-6,78	-6,78	-6,78	-9,54
14	Inferior	-8,11	-6,19	-6,19	-6,19	-6,19	-8,95
15	Superior	-8,66	-6,74	-6,74	-6,74	-6,74	-9,49
15	Inferior	-8,13	-6,22	-6,22	-6,22	-6,22	-8,97
16	Superior	-8,61	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,45
16	Inferior	-8,16	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-9,00
17	Superior	-8,55	-6,65	-6,65	-6,65	-6,65	-9,39
17	Inferior	-8,19	-6,29	-6,29	-6,29	-6,29	-9,03
18	Superior	-8,49	-6,59	-6,59	-6,59	-6,59	-9,33
18	Inferior	-8,24	-6,34	-6,34	-6,34	-6,34	-9,07
19	Superior	-8,42	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,26
19	Inferior	-8,29	-6,39	-6,39	-6,39	-6,39	-9,12
20	Superior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18
20	Inferior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente (CQP)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CQP): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): -21,72 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): 3,55 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CF): Efp + Hfp + Mg1

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,5\text{mm}$).txt

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): $1.1 \cdot E_{ip} + 1.1 \cdot H_{ip} + Mg_1$ Combinação Padrão 2 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1$ Combinação Padrão 3 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1 + Mg_2$ Combinação Padrão 4 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1 + Mg_2 + 0,4 \cdot M_{m\acute{a}x}$ Combinação Padrão 5 (CF): $E_{fp} + H_{fp} + Mg_1 + Mg_2 + 0,4 \cdot M_{m\grave{m}n}$ Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): $1.1 \cdot E_{ip} + 1.1 \cdot H_{ip} + Mg_1$

Seção	Borda	CP-1 (CF)	CP-2 (CF)	CP-3 (CF)	CP-4 (CF)	CP-5 (CF)	CP-6 (CF-ELU-CE)
0	Superior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18
0	Inferior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18
1	Superior	-8,42	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,26
1	Inferior	-8,29	-6,39	-6,39	-6,39	-6,39	-9,12
2	Superior	-8,49	-6,59	-6,59	-6,59	-6,59	-9,33
2	Inferior	-8,24	-6,34	-6,34	-6,34	-6,34	-9,07
3	Superior	-8,55	-6,65	-6,65	-6,65	-6,65	-9,39
3	Inferior	-8,19	-6,29	-6,29	-6,29	-6,29	-9,03
4	Superior	-8,61	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,45
4	Inferior	-8,16	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-9,00
5	Superior	-8,66	-6,74	-6,74	-6,74	-6,74	-9,49
5	Inferior	-8,13	-6,22	-6,22	-6,22	-6,22	-8,97
6	Superior	-8,70	-6,78	-6,78	-6,78	-6,78	-9,54
6	Inferior	-8,11	-6,19	-6,19	-6,19	-6,19	-8,95
7	Superior	-8,73	-6,81	-6,81	-6,81	-6,81	-9,57
7	Inferior	-8,09	-6,17	-6,17	-6,17	-6,17	-8,93
8	Superior	-8,76	-6,84	-6,84	-6,84	-6,84	-9,60
8	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
9	Superior	-8,78	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	-9,62
9	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
10	Superior	-8,79	-6,86	-6,86	-6,86	-6,86	-9,63
10	Inferior	-8,09	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,93
11	Superior	-8,78	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	-9,62
11	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
12	Superior	-8,76	-6,84	-6,84	-6,84	-6,84	-9,60
12	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
13	Superior	-8,73	-6,81	-6,81	-6,81	-6,81	-9,57
13	Inferior	-8,09	-6,17	-6,17	-6,17	-6,17	-8,93
14	Superior	-8,70	-6,78	-6,78	-6,78	-6,78	-9,54
14	Inferior	-8,11	-6,19	-6,19	-6,19	-6,19	-8,95
15	Superior	-8,66	-6,74	-6,74	-6,74	-6,74	-9,49
15	Inferior	-8,13	-6,22	-6,22	-6,22	-6,22	-8,97
16	Superior	-8,61	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,45
16	Inferior	-8,16	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-9,00
17	Superior	-8,55	-6,65	-6,65	-6,65	-6,65	-9,39
17	Inferior	-8,19	-6,29	-6,29	-6,29	-6,29	-9,03
18	Superior	-8,49	-6,59	-6,59	-6,59	-6,59	-9,33
18	Inferior	-8,24	-6,34	-6,34	-6,34	-6,34	-9,07
19	Superior	-8,42	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,26
19	Inferior	-8,29	-6,39	-6,39	-6,39	-6,39	-9,12
20	Superior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18
20	Inferior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Frequente (CF)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): -21,72 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 2,96 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013
Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,5\text{mm}$).txt

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Frequente (CF)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF): -18,62 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): -21,72 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 2,96 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): 3,55 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx

Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmin

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
0	Superior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18
0	Inferior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18
1	Superior	-8,42	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,26
1	Inferior	-8,29	-6,39	-6,39	-6,39	-6,39	-9,12
2	Superior	-8,49	-6,59	-6,59	-6,59	-6,59	-9,33
2	Inferior	-8,24	-6,34	-6,34	-6,34	-6,34	-9,07
3	Superior	-8,55	-6,65	-6,65	-6,65	-6,65	-9,39
3	Inferior	-8,19	-6,29	-6,29	-6,29	-6,29	-9,03
4	Superior	-8,61	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,45
4	Inferior	-8,16	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-9,00
5	Superior	-8,66	-6,74	-6,74	-6,74	-6,74	-9,49
5	Inferior	-8,13	-6,22	-6,22	-6,22	-6,22	-8,97
6	Superior	-8,70	-6,78	-6,78	-6,78	-6,78	-9,54
6	Inferior	-8,11	-6,19	-6,19	-6,19	-6,19	-8,95
7	Superior	-8,73	-6,81	-6,81	-6,81	-6,81	-9,57
7	Inferior	-8,09	-6,17	-6,17	-6,17	-6,17	-8,93
8	Superior	-8,76	-6,84	-6,84	-6,84	-6,84	-9,60
8	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
9	Superior	-8,78	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	-9,62
9	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
10	Superior	-8,79	-6,86	-6,86	-6,86	-6,86	-9,63
10	Inferior	-8,09	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,93
11	Superior	-8,78	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	-9,62
11	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
12	Superior	-8,76	-6,84	-6,84	-6,84	-6,84	-9,60
12	Inferior	-8,08	-6,16	-6,16	-6,16	-6,16	-8,92
13	Superior	-8,73	-6,81	-6,81	-6,81	-6,81	-9,57
13	Inferior	-8,09	-6,17	-6,17	-6,17	-6,17	-8,93
14	Superior	-8,70	-6,78	-6,78	-6,78	-6,78	-9,54
14	Inferior	-8,11	-6,19	-6,19	-6,19	-6,19	-8,95
15	Superior	-8,66	-6,74	-6,74	-6,74	-6,74	-9,49
15	Inferior	-8,13	-6,22	-6,22	-6,22	-6,22	-8,97
16	Superior	-8,61	-6,70	-6,70	-6,70	-6,70	-9,45
16	Inferior	-8,16	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-9,00
17	Superior	-8,55	-6,65	-6,65	-6,65	-6,65	-9,39
17	Inferior	-8,19	-6,29	-6,29	-6,29	-6,29	-9,03
18	Superior	-8,49	-6,59	-6,59	-6,59	-6,59	-9,33
18	Inferior	-8,24	-6,34	-6,34	-6,34	-6,34	-9,07
19	Superior	-8,42	-6,52	-6,52	-6,52	-6,52	-9,26
19	Inferior	-8,29	-6,39	-6,39	-6,39	-6,39	-9,12

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 ($\delta=1,5\text{mm}$).txtTensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1
 Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1
 Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2
 Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx
 Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmín
 Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
20	Superior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18
20	Inferior	-8,35	-6,45	-6,45	-6,45	-6,45	-9,18

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Rara (CR)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CR): -18,62 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR): -18,62 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): -21,72 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 2,96 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): 3,55 MPa

Classificação Quanto ao Grau de Protensão (NBR-6118/2007)

Tipo de Concreto Estrutural	Exigências Relativas à Fissuração	Combinação de Ações em Serviço a Utilizar	Status da Verificação
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Combinação Frequente (CF)	Verificação não Necessária
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)	ELS-F	Combinação Frequente (CF)	Atendida
	ELS-D	Combinação Quase Permanente (CQP)	Atendida
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)	ELS-F	Combinação Rara (CR)	Atendida
	ELS-D	Combinação Frequente (CF)	Atendida

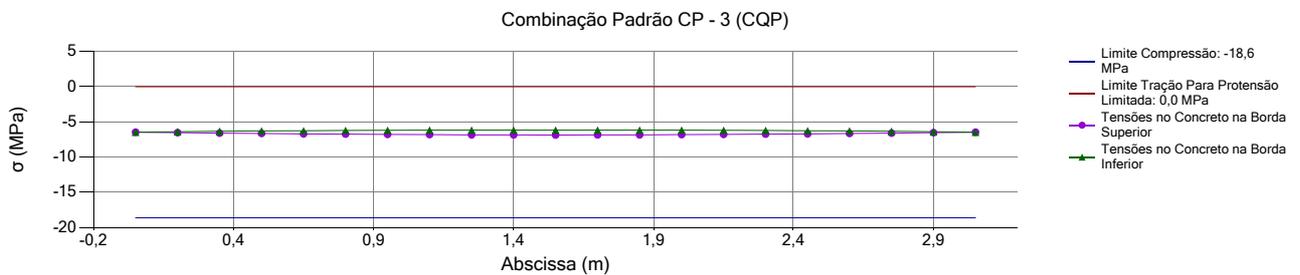
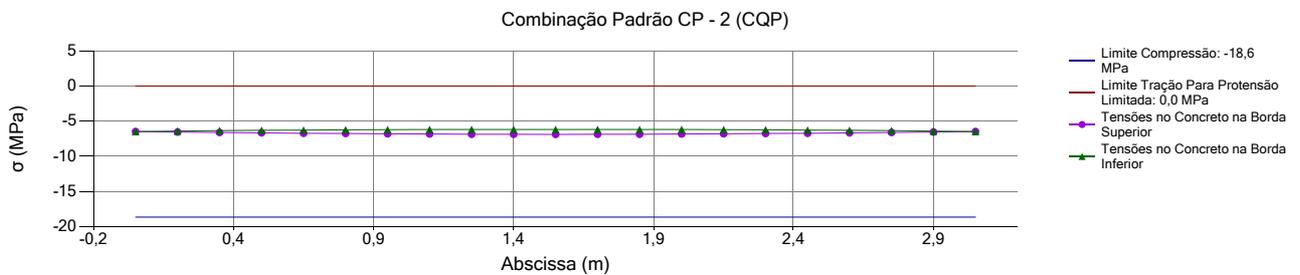
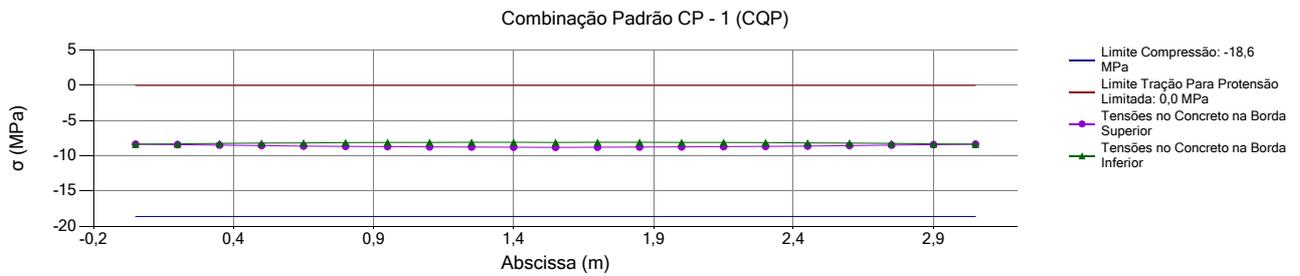
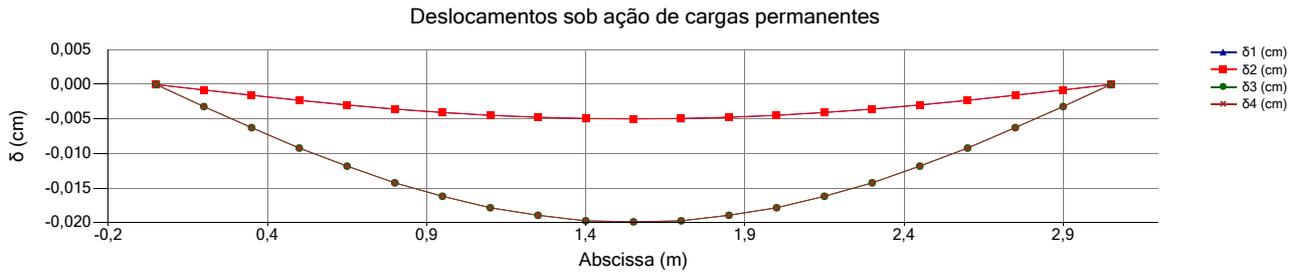
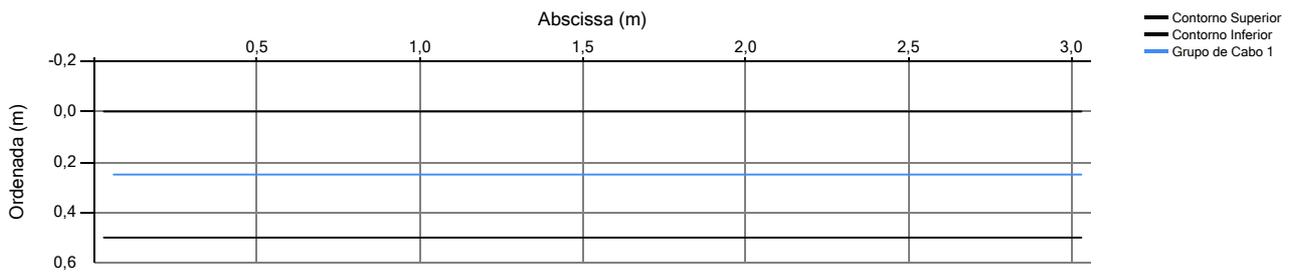
A estrutura atende aos requisitos prescritos pela NBR-6118/2007 para Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)
 e Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)

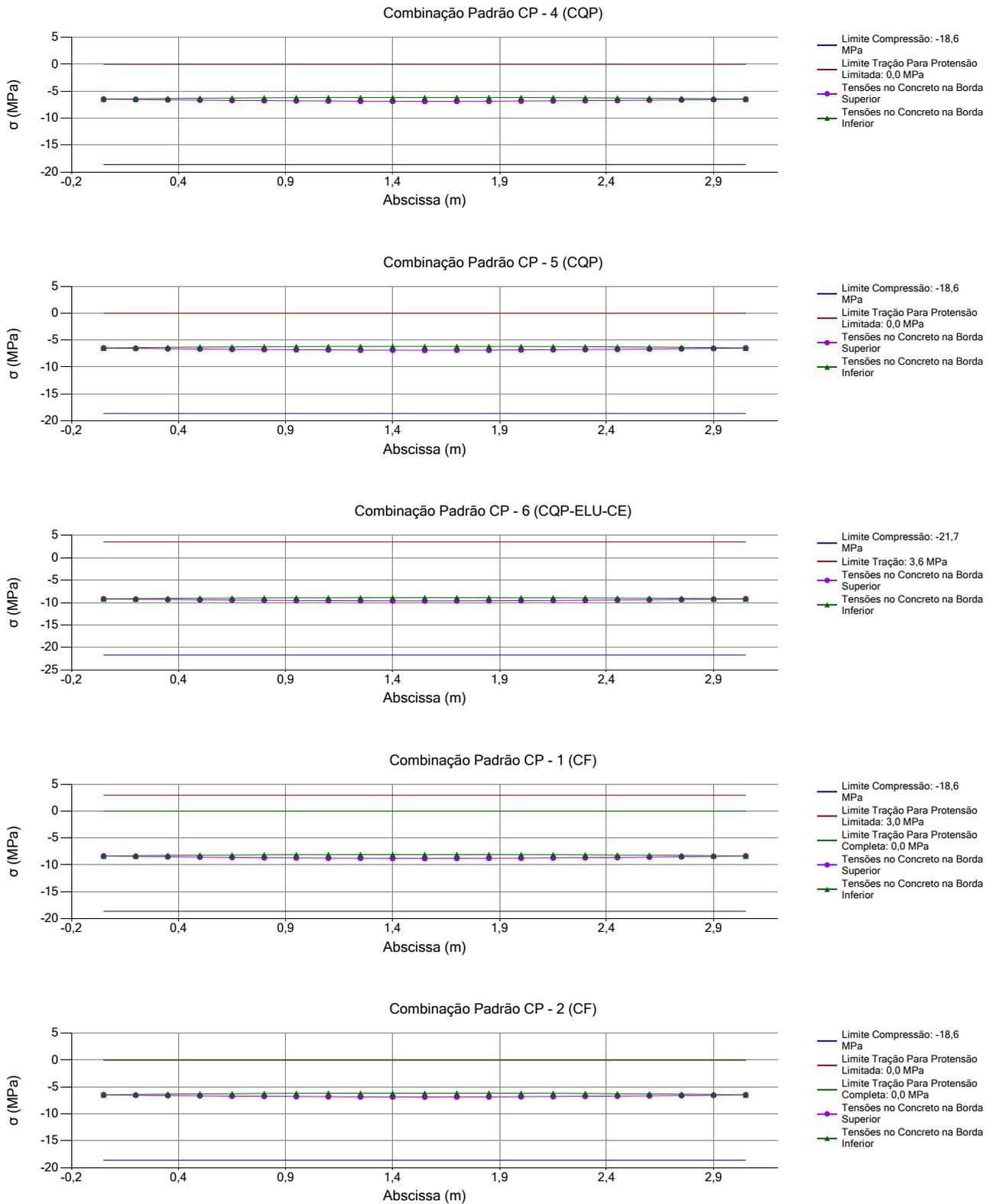
Deslocamentos sob Ação de Cargas Permanentes

Seção	δ_1 - Desl. Iniciais sem Prot. (cm)	δ_2 - Des. Iniciais com Prot. (cm)	δ_3 - Des. Finais sem Prot. (cm)	δ_4 - Des. Finais com Prot. (cm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	-0,01	-0,01
3	0,00	0,00	-0,01	-0,01
4	0,00	0,00	-0,01	-0,01
5	0,00	0,00	-0,01	-0,01
6	0,00	0,00	-0,02	-0,02
7	0,00	0,00	-0,02	-0,02
8	0,00	0,00	-0,02	-0,02
9	0,00	0,00	-0,02	-0,02
10	0,00	0,00	-0,02	-0,02
11	0,00	0,00	-0,02	-0,02
12	0,00	0,00	-0,02	-0,02
13	0,00	0,00	-0,02	-0,02
14	0,00	0,00	-0,02	-0,02
15	0,00	0,00	-0,01	-0,01
16	0,00	0,00	-0,01	-0,01
17	0,00	0,00	-0,01	-0,01
18	0,00	0,00	-0,01	-0,01
19	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

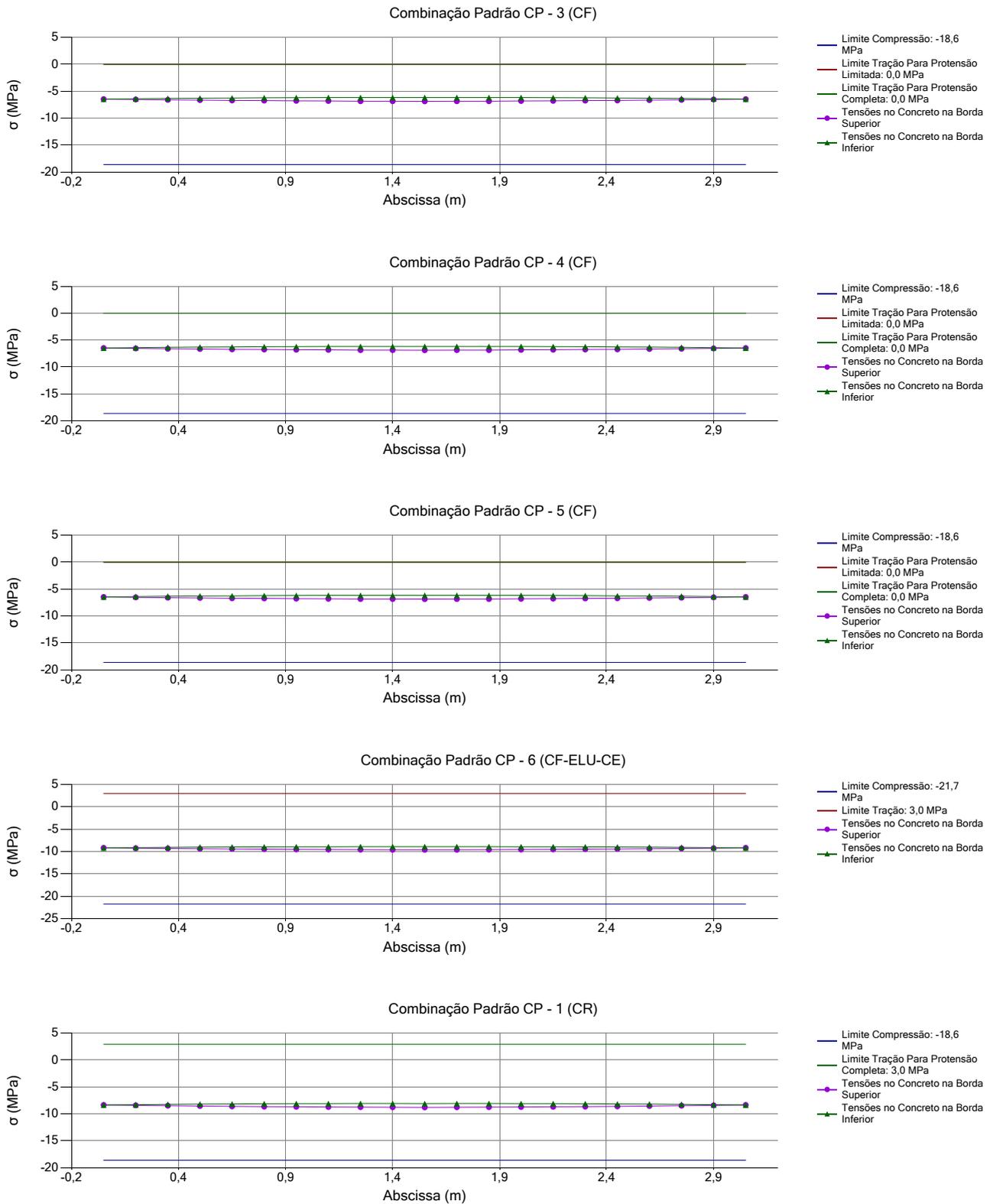
Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 (δ=1,5mm).txt

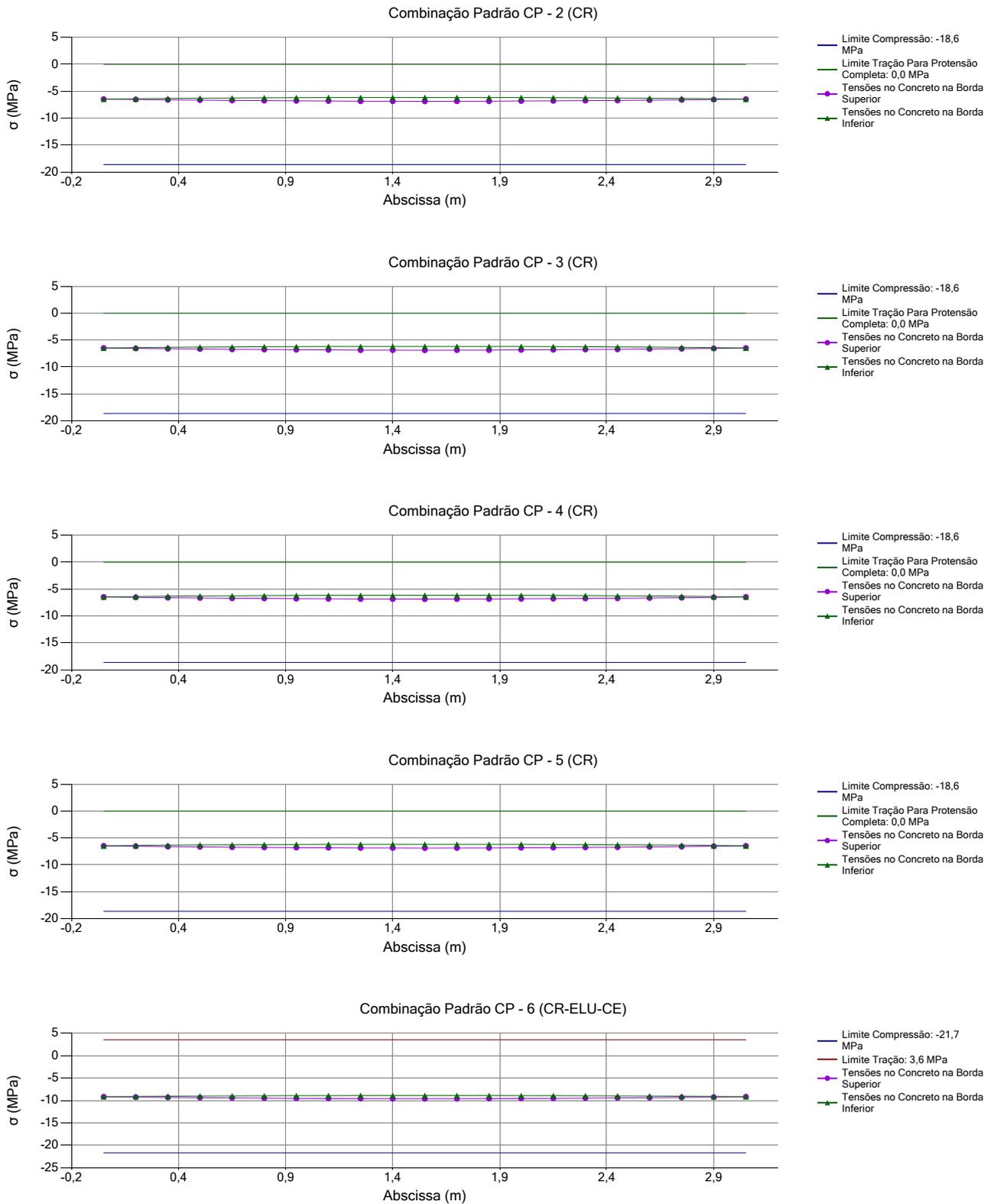




Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: Viga 1 e Viga 2 (δ=1,5mm).txt





APÊNDICE F

RELATÓRIO DE CÁLCULO – VIGA CAIXÃO

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: NBR 6118.txt

Dados Iniciais

Número de Apoios: 2

Número de Seções: 9

Número de Propriedades Geométricas: 1

Número de Grupos de Cabos de Protensão: 5

Número de Combinações Adicionais: 0

Tipo de Estrutura: Passarela de Pedestre

Apoios

Número do Apoio	Abcissa do Apoio	Nome do Apoio
1	7,500	A1
2	37,500	A2

Características Geométricas das Seções

Número da Seção	Abcissa (m)	Área (m ²)	Inércia (m ⁴)	Altura (m)	Ycg (m)	Perímetro (m)
0	0,000	4,685	4,221	2,500	0,919	24,200
1	7,500	4,685	4,221	2,500	0,919	24,200
2	13,800	4,685	4,221	2,500	0,919	24,200
3	20,100	4,685	4,221	2,500	0,919	24,200
4	22,500	4,685	4,221	2,500	0,919	24,200
5	24,900	4,685	4,221	2,500	0,919	24,200
6	31,200	4,685	4,221	2,500	0,919	24,200
7	37,500	4,685	4,221	2,500	0,919	24,200
8	45,000	4,685	4,221	2,500	0,919	24,200

Envoltória de Momentos Fletores

Número da Seção	Mg-1 (KNm)	Mg-2 (KNm)	Mmáx (KNm)	Mmin (KNm)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-2.183,000	-760,000	0,000	0,000
2	3.612,000	1.257,000	0,000	0,000
3	6.326,000	2.202,000	0,000	0,000
4	6.550,000	2.280,000	0,000	0,000
5	6.326,000	2.202,000	0,000	0,000
6	3.612,000	1.257,000	0,000	0,000
7	-2.183,000	-760,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000

Envoltória de Esforços Cortante

Número da Seção	Vg-1 (KN)	Vg-2 (KN)	Vmáx (KN)	Vmin (KN)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000

Dados de Protensão

Módulo de Elasticidade Longitudinal do Aço: 195.000,00 MPa

Resistência Característica à Tração do Aço (f_{ptk}): 1.900,00 MPa

Tipo de Cordoalhas: RB

Coeficiente de Atrito entre o Cabo e a Bainha: 0,20

Perda de Atrito por Metro: 0,20 % /m

Escorregamento na Ancoragem: 0,006 m

Umidade Relativa do Ar: 80,00 %

Temperatura Ambiente: 20,00 °C

Data da Protensão: 14,00 dias

Nome do Material do Aço de Protensão: AP-1

Slump do Concreto: 8,00 cm

Data de Início da Cura do Concreto: 14,00 dias

Resistência Característica à Compressão do Concreto (f_{ck}): 24,00 MPa

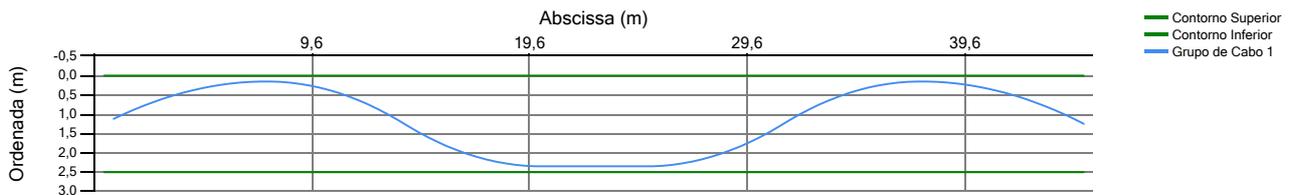
Dados de Protensão

Módulo de Elasticidade Longitudinal do Aço: 195.000,00 MPa
 Resistência Característica à Tração do Aço (f_{ptk}): 1.900,00 MPa
 Tipo de Cordoalhas: RB
 Coeficiente de Atrito entre o Cabo e a Bainha: 0,20
 Perda de Atrito por Metro: 0,20 % /m
 Escorregamento na Ancoragem: 0,006 m
 Umidade Relativa do Ar: 80,00 %
 Temperatura Ambiente: 20,00 °C
 Data da Protensão: 14,00 dias
 Nome do Material do Aço de Protensão: AP-1
 Slump do Concreto: 8,00 cm
 Data de Início da Cura do Concreto: 14,00 dias
 Resistência Característica à Compressão do Concreto (f_{ck}): 24,00 MPa
 Tipo de Cimento: CP-II
 Tempo de Análise: 10000 dias
 Nome do Material Concreto: Concreto-C24

Grupos de Cabos de ProtensãoGrupo 1 - G1

Área de Aço: 12,17 cm²
 Número de Cabos: 2
 Tensão Inicial: 1.324,30 MPa
 Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades
 Desvio Angular Horizontal: 0,00°
 Número de Pontos Notáveis: 8
 Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	1,25
2	7,50	0,15
3	13,80	Ponto de Inflexão
4	20,10	2,35
5	24,90	2,35
6	31,20	Ponto de Inflexão
7	37,50	0,15
8	45,00	1,25

Grupo 2 - G2

Área de Aço: 12,17 cm²
 Número de Cabos: 2
 Tensão Inicial: 1.324,30 MPa
 Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades
 Desvio Angular Horizontal: 0,00°
 Número de Pontos Notáveis: 8
 Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	1,25
2	7,50	0,15
3	13,80	Ponto de Inflexão
4	20,10	2,35
5	24,90	2,35

Grupos de Cabos de ProtensãoGrupo 2 - G2Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

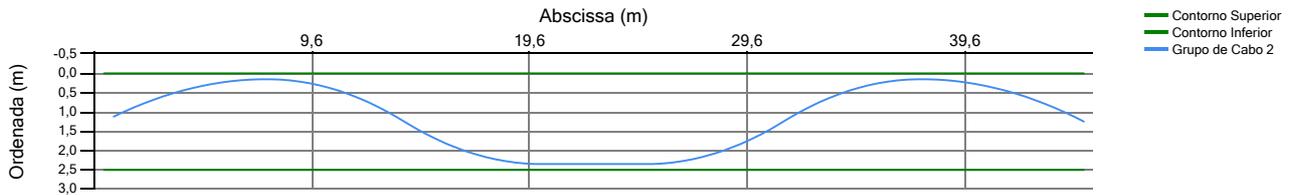
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 0,00°

Número de Pontos Notáveis: 8

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
6	31,20	Ponto de Inflexão
7	37,50	0,15
8	45,00	1,25

Grupo 3 - G3Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

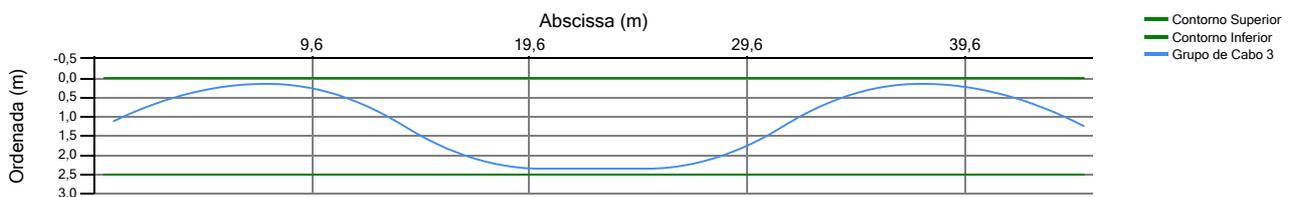
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 0,00°

Número de Pontos Notáveis: 8

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	1,25
2	7,50	0,15
3	13,80	Ponto de Inflexão
4	20,10	2,35
5	24,90	2,35
6	31,20	Ponto de Inflexão
7	37,50	0,15
8	45,00	1,25

Grupo 4 - G4Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 0,00°

Número de Pontos Notáveis: 8

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	1,25

Grupos de Cabos de Protensão

Grupo 4 - G4

Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

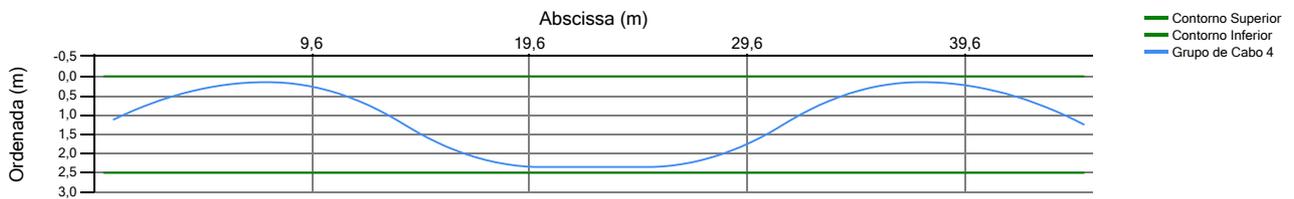
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 0,00°

Número de Pontos Notáveis: 8

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
2	7,50	0,15
3	13,80	Ponto de Inflexão
4	20,10	2,35
5	24,90	2,35
6	31,20	Ponto de Inflexão
7	37,50	0,15
8	45,00	1,25



Grupo 5 - G5

Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

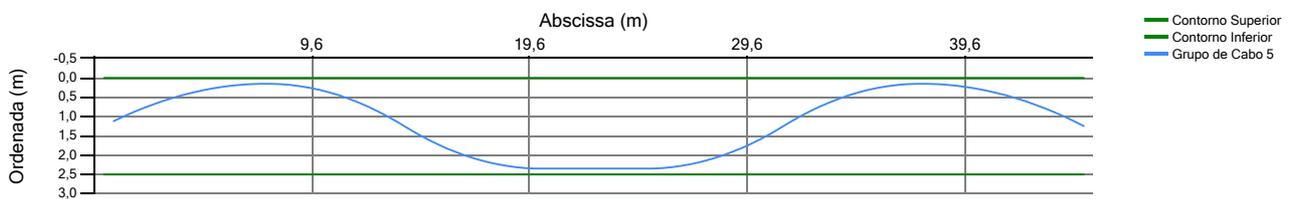
Modo de Protensão: Cabo protendido por ambas as extremidades

Desvio Angular Horizontal: 0,00°

Número de Pontos Notáveis: 8

Coordenadas dos Pontos Notáveis:

Ponto	X (m)	Y (m)
1	0,00	1,25
2	7,50	0,15
3	13,80	Ponto de Inflexão
4	20,10	2,35
5	24,90	2,35
6	31,20	Ponto de Inflexão
7	37,50	0,15
8	45,00	1,25



Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 1 - G1

Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 16,35°

Ângulo no Final do Cabo: -16,35°

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 1 - G1

Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 16,35°

Ângulo no Final do Cabo: -16,35°

Variação Angular Vertical: 109,69°

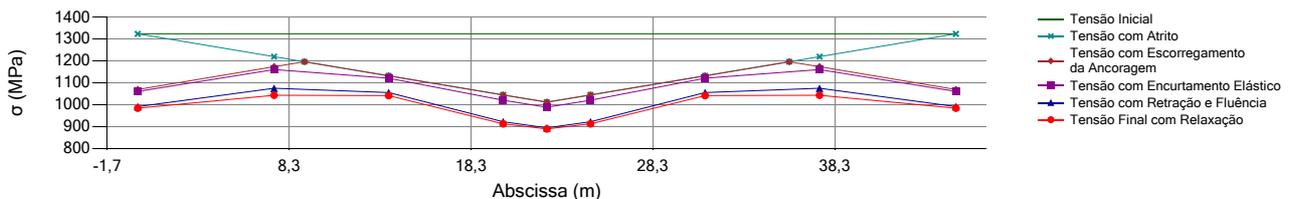
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 45,00 m

Comprimento Total do Cabo: 45,72 m

Alongamento do Cabo: 13,69 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 9,17 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
0	1,25	16,35	0,0	1.324,3	-255,2	-8,9	1.060,1	-69,6	-7,1	983,4	25,7
1	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	-12,5	1.161,0	-86,1	-32,0	1.042,9	21,3
2	1,25	-19,25	-192,1	1.132,2	0,0	-10,8	1.121,4	-65,9	-14,5	1.041,0	21,4
3	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	-24,3	1.020,3	-98,7	-9,9	911,7	31,2
4	2,35	0,00	-313,1	1.011,2	0,0	-23,4	987,8	-94,6	-5,2	888,1	32,9
5	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	-24,3	1.020,3	-98,7	-9,9	911,7	31,2
6	1,25	19,25	-192,1	1.132,2	0,0	-10,8	1.121,4	-65,9	-14,5	1.041,0	21,4
7	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	-12,5	1.161,0	-86,1	-32,0	1.042,9	21,3
8	1,25	-16,35	0,0	1.324,3	-255,2	-8,9	1.060,1	-69,6	-7,1	983,4	25,7



Grupo 2 - G2

Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 16,35°

Ângulo no Final do Cabo: -16,35°

Variação Angular Vertical: 109,69°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 45,00 m

Comprimento Total do Cabo: 45,72 m

Alongamento do Cabo: 13,69 cm / extremidade com ancoragem ativa

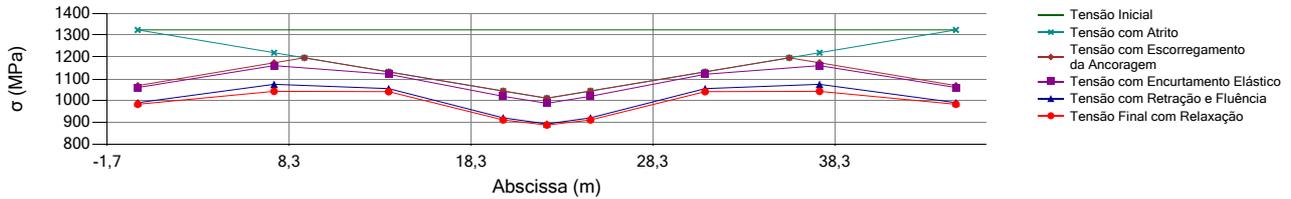
Comprimento de Ancoragem: 9,17 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ Atrito (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
0	1,25	16,35	0,0	1.324,3	-255,2	-8,9	1.060,1	-69,6	-7,1	983,4	25,7
1	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	-12,5	1.161,0	-86,1	-32,0	1.042,9	21,3
2	1,25	-19,25	-192,1	1.132,2	0,0	-10,8	1.121,4	-65,9	-14,5	1.041,0	21,4
3	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	-24,3	1.020,3	-98,7	-9,9	911,7	31,2
4	2,35	0,00	-313,1	1.011,2	0,0	-23,4	987,8	-94,6	-5,2	888,1	32,9
5	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	-24,3	1.020,3	-98,7	-9,9	911,7	31,2
6	1,25	19,25	-192,1	1.132,2	0,0	-10,8	1.121,4	-65,9	-14,5	1.041,0	21,4
7	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	-12,5	1.161,0	-86,1	-32,0	1.042,9	21,3
8	1,25	-16,35	0,0	1.324,3	-255,2	-8,9	1.060,1	-69,6	-7,1	983,4	25,7

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: NBR 6118.txt

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções



Grupo 3 - G3

Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 16,35°

Ângulo no Final do Cabo: -16,35°

Variação Angular Vertical: 109,69°

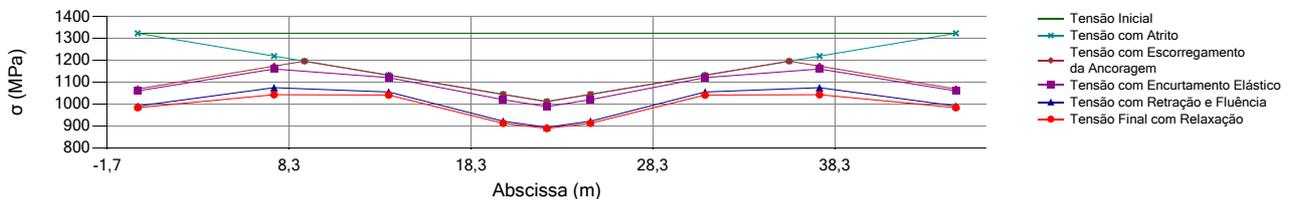
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 45,00 m

Comprimento Total do Cabo: 45,72 m

Alongamento do Cabo: 13,69 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 9,17 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσatr. (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσesc. (MPa)	Δσenc. (MPa)	σinst. (MPa)	Δσcs (MPa)	Δσr (MPa)	σfim (MPa)	Δσi (%)
0	1,25	16,35	0,0	1.324,3	-255,2	-8,9	1.060,1	-69,6	-7,1	983,4	25,7
1	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	-12,5	1.161,0	-86,1	-32,0	1.042,9	21,3
2	1,25	-19,25	-192,1	1.132,2	0,0	-10,8	1.121,4	-65,9	-14,5	1.041,0	21,4
3	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	-24,3	1.020,3	-98,7	-9,9	911,7	31,2
4	2,35	0,00	-313,1	1.011,2	0,0	-23,4	987,8	-94,6	-5,2	888,1	32,9
5	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	-24,3	1.020,3	-98,7	-9,9	911,7	31,2
6	1,25	19,25	-192,1	1.132,2	0,0	-10,8	1.121,4	-65,9	-14,5	1.041,0	21,4
7	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	-12,5	1.161,0	-86,1	-32,0	1.042,9	21,3
8	1,25	-16,35	0,0	1.324,3	-255,2	-8,9	1.060,1	-69,6	-7,1	983,4	25,7



Grupo 4 - G4

Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 16,35°

Ângulo no Final do Cabo: -16,35°

Variação Angular Vertical: 109,69°

Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 45,00 m

Comprimento Total do Cabo: 45,72 m

Alongamento do Cabo: 13,69 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 9,17 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	Δσatr. (MPa)	σ Atrito (MPa)	Δσesc. (MPa)	Δσenc. (MPa)	σinst. (MPa)	Δσcs (MPa)	Δσr (MPa)	σfim (MPa)	Δσi (%)
0	1,25	16,35	0,0	1.324,3	-255,2	-8,9	1.060,1	-69,6	-7,1	983,4	25,7
1	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	-12,5	1.161,0	-86,1	-32,0	1.042,9	21,3
2	1,25	-19,25	-192,1	1.132,2	0,0	-10,8	1.121,4	-65,9	-14,5	1.041,0	21,4
3	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	-24,3	1.020,3	-98,7	-9,9	911,7	31,2
4	2,35	0,00	-313,1	1.011,2	0,0	-23,4	987,8	-94,6	-5,2	888,1	32,9
5	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	-24,3	1.020,3	-98,7	-9,9	911,7	31,2
6	1,25	19,25	-192,1	1.132,2	0,0	-10,8	1.121,4	-65,9	-14,5	1.041,0	21,4
7	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	-12,5	1.161,0	-86,1	-32,0	1.042,9	21,3
8	1,25	-16,35	0,0	1.324,3	-255,2	-8,9	1.060,1	-69,6	-7,1	983,4	25,7

Posição dos Cabos de Protensão e Tensões nas Seções

Grupo 5 - G5

Área de Aço: 12,17 cm²

Número de Cabos: 2

Tensão Inicial: 1.324,30 MPa

Ângulo no Início do Cabo: 16,35°

Ângulo no Final do Cabo: -16,35°

Variação Angular Vertical: 109,69°

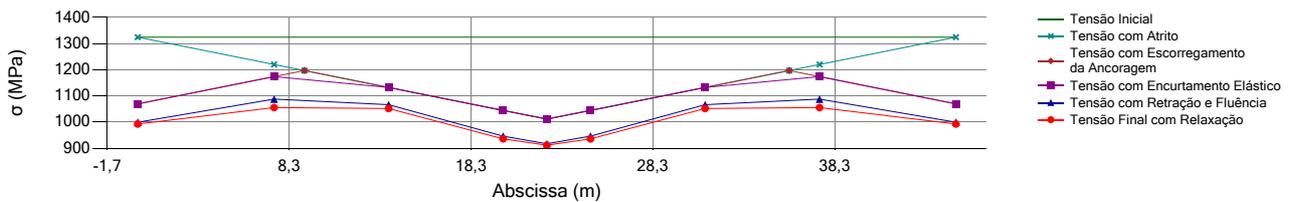
Comprimento da Projeção Horizontal do Cabo: 45,00 m

Comprimento Total do Cabo: 45,72 m

Alongamento do Cabo: 13,69 cm / extremidade com ancoragem ativa

Comprimento de Ancoragem: 9,17 m

Seção	Y-cabo (m)	Ângulo(°)	$\Delta\sigma_{atr.}$ (MPa)	σ_{Atrito} (MPa)	$\Delta\sigma_{esc.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{enc.}$ (MPa)	$\sigma_{inst.}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{cs}$ (MPa)	$\Delta\sigma_r$ (MPa)	σ_{fim} (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
0	1,25	16,35	0,0	1.324,3	-255,2	0,0	1.069,1	-69,6	-7,1	992,3	25,1
1	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	0,0	1.173,5	-86,1	-32,0	1.055,4	20,3
2	1,25	-19,25	-192,1	1.132,2	0,0	0,0	1.132,2	-65,9	-14,5	1.051,9	20,6
3	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	0,0	1.044,6	-98,7	-9,9	935,9	29,3
4	2,35	0,00	-313,1	1.011,2	0,0	0,0	1.011,2	-94,6	-5,2	911,4	31,2
5	2,35	0,00	-279,7	1.044,6	0,0	0,0	1.044,6	-98,7	-9,9	935,9	29,3
6	1,25	19,25	-192,1	1.132,2	0,0	0,0	1.132,2	-65,9	-14,5	1.051,9	20,6
7	0,15	0,00	-104,4	1.219,9	-46,5	0,0	1.173,5	-86,1	-32,0	1.055,4	20,3
8	1,25	-16,35	0,0	1.324,3	-255,2	0,0	1.069,1	-69,6	-7,1	992,3	25,1



Esforços Iniciais de Protensão

Seção	Nip (KN)	Vip (KN)	Mip (KNm)	Vhip (KN)	Mhip (KNm)
0	-12.399,15	3.637,09	-4.104,12	-	-
1 esq.	-14.157,07	0,00	10.886,79	-	-
1 dir.	-14.157,07	0,00	10.886,79	-	-
2	-12.907,36	-4.507,33	-4.272,34	-	-
3	-12.473,85	0,00	-17.850,07	-	-
4	-12.076,49	0,00	-17.281,46	-	-
5	-12.473,85	0,00	-17.850,07	-	-
6	-12.907,36	4.507,33	-4.272,34	-	-
7 esq.	-14.157,07	0,00	10.886,79	-	-
7 dir.	-14.157,07	0,00	10.886,79	-	-
8	-12.399,15	-3.637,09	-4.104,12	-	-

Reações Hiperestáticas Iniciais

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Inicial no Apoio 2: -

Esforços Finais de Protensão

Seção	Nfp (KN)	Vfp (KN)	Mfp (KNm)	Vhfp (KN)	Mhfp (KNm)
0	-11.502,90	3.374,19	-3.807,46	-	-
1 esq.	-12.719,87	0,00	9.781,58	-	-
1 dir.	-12.719,87	0,00	9.781,58	-	-
2	-11.983,83	-4.184,83	-3.966,65	-	-
3	-11.152,08	0,00	-15.958,62	-	-
4	-10.862,81	0,00	-15.544,69	-	-
5	-11.152,08	0,00	-15.958,62	-	-
6	-11.983,83	4.184,83	-3.966,65	-	-

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: NBR 6118.txt

Esforços Finais de Protensão

Seção	Nfp (KN)	Vfp (KN)	Mfp (KNm)	Vhfp (KN)	Mhfp (KNm)
7 esq.	-12.719,87	0,00	9.781,58	-	-
7 dir.	-12.719,87	0,00	9.781,58	-	-
8	-11.502,90	-3.374,19	-3.807,46	-	-

Reações Hiperestáticas Finais

Reação Hiperestática Final no Apoio 1: -

Reação Hiperestática Final no Apoio 2: -

Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente - CQP (MPa)

Combinação Padrão 1 (CQP): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CQP): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CQP): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,3*Mmin

Combinação Padrão 6 (CQP-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CQP)	CP-2 (CQP)	CP-3 (CQP)	CP-4 (CQP)	CP-5 (CQP)	CP-6 (CQP-ELU-CE)
0	Superior	-1,75	-1,63	-1,63	-1,63	-1,63	-1,93
0	Inferior	-4,18	-3,88	-3,88	-3,88	-3,88	-4,60
1	Superior	-4,92	-4,37	-4,20	-4,20	-4,20	-5,46
1	Inferior	0,24*	0,13*	-0,15	-0,15	-0,15	0,34
2	Superior	-2,61	-2,48	-2,75	-2,75	-2,75	-2,79
2	Inferior	-3,00	-2,69	-2,22	-2,22	-2,22	-3,44
3	Superior	-0,15	-0,28	-0,76	-0,76	-0,76	-0,03
3	Inferior	-6,98	-5,99	-5,16	-5,16	-5,16	-7,91
4	Superior	-0,24	-0,36	-0,86	-0,86	-0,86	-0,12
4	Inferior	-6,60	-5,69	-4,83	-4,83	-4,83	-7,50
5	Superior	-0,15	-0,28	-0,76	-0,76	-0,76	-0,03
5	Inferior	-6,98	-5,99	-5,16	-5,16	-5,16	-7,91
6	Superior	-2,61	-2,48	-2,75	-2,75	-2,75	-2,79
6	Inferior	-3,00	-2,69	-2,22	-2,22	-2,22	-3,44
7	Superior	-4,92	-4,37	-4,20	-4,20	-4,20	-5,46
7	Inferior	0,24*	0,13*	-0,15	-0,15	-0,15	0,34
8	Superior	-1,75	-1,63	-1,63	-1,63	-1,63	-1,93
8	Inferior	-4,18	-3,88	-3,88	-3,88	-3,88	-4,60

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Quase Permanente (CQP)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CQP): -12,98 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP): -14,40 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): -15,15 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CQP) a CP-5 (CQP) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CQP-ELU-CE): 2,80 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CF): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,4*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,4*Mmin

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CF)	CP-2 (CF)	CP-3 (CF)	CP-4 (CF)	CP-5 (CF)	CP-6 (CF-ELU-CE)
0	Superior	-1,75	-1,63	-1,63	-1,63	-1,63	-1,93
0	Inferior	-4,18	-3,88	-3,88	-3,88	-3,88	-4,60
1	Superior	-4,92	-4,37	-4,20	-4,20	-4,20	-5,46
1	Inferior	0,24*	0,13*	-0,15	-0,15	-0,15	0,34

Tensões nas Seções - Combinação Frequente - CF (MPa)

Combinação Padrão 1 (CF): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CF): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,4*Mmáx

Combinação Padrão 5 (CF): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + 0,4*Mmín

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CF)	CP-2 (CF)	CP-3 (CF)	CP-4 (CF)	CP-5 (CF)	CP-6 (CF-ELU-CE)
2	Superior	-2,61	-2,48	-2,75	-2,75	-2,75	-2,79
2	Inferior	-3,00	-2,69	-2,22	-2,22	-2,22	-3,44
3	Superior	-0,15	-0,28	-0,76	-0,76	-0,76	-0,03
3	Inferior	-6,98	-5,99	-5,16	-5,16	-5,16	-7,91
4	Superior	-0,24	-0,36	-0,86	-0,86	-0,86	-0,12
4	Inferior	-6,60	-5,69	-4,83	-4,83	-4,83	-7,50
5	Superior	-0,15	-0,28	-0,76	-0,76	-0,76	-0,03
5	Inferior	-6,98	-5,99	-5,16	-5,16	-5,16	-7,91
6	Superior	-2,61	-2,48	-2,75	-2,75	-2,75	-2,79
6	Inferior	-3,00	-2,69	-2,22	-2,22	-2,22	-3,44
7	Superior	-4,92	-4,37	-4,20	-4,20	-4,20	-5,46
7	Inferior	0,24*	0,13*	-0,15	-0,15	-0,15	0,34
8	Superior	-1,75	-1,63	-1,63	-1,63	-1,63	-1,93
8	Inferior	-4,18	-3,88	-3,88	-3,88	-3,88	-4,60

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Frequente (CF)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CF): -12,98 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF): -14,40 MPa

Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): -15,15 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 2,33 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Limitada: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CF) a CP-5 (CF) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa

Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CF-ELU-CE): 2,80 MPa

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1

Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1

Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2

Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx

Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmín

Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
0	Superior	-1,75	-1,63	-1,63	-1,63	-1,63	-1,93
0	Inferior	-4,18	-3,88	-3,88	-3,88	-3,88	-4,60
1	Superior	-4,92	-4,37	-4,20	-4,20	-4,20	-5,46
1	Inferior	0,24	0,13*	-0,15	-0,15	-0,15	0,34
2	Superior	-2,61	-2,48	-2,75	-2,75	-2,75	-2,79
2	Inferior	-3,00	-2,69	-2,22	-2,22	-2,22	-3,44
3	Superior	-0,15	-0,28	-0,76	-0,76	-0,76	-0,03
3	Inferior	-6,98	-5,99	-5,16	-5,16	-5,16	-7,91
4	Superior	-0,24	-0,36	-0,86	-0,86	-0,86	-0,12
4	Inferior	-6,60	-5,69	-4,83	-4,83	-4,83	-7,50
5	Superior	-0,15	-0,28	-0,76	-0,76	-0,76	-0,03
5	Inferior	-6,98	-5,99	-5,16	-5,16	-5,16	-7,91
6	Superior	-2,61	-2,48	-2,75	-2,75	-2,75	-2,79
6	Inferior	-3,00	-2,69	-2,22	-2,22	-2,22	-3,44

Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: NBR 6118.txt

Tensões nas Seções - Combinação Rara - CR (MPa)

Combinação Padrão 1 (CR): Eip + Hip + Mg1
 Combinação Padrão 2 (CR): Efp + Hfp + Mg1
 Combinação Padrão 3 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2
 Combinação Padrão 4 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmáx
 Combinação Padrão 5 (CR): Efp + Hfp + Mg1 + Mg2 + Mmín
 Combinação Padrão 6 (CF-ELU-CE): 1.1*Eip + 1.1*Hip + Mg1

Seção	Borda	CP-1 (CR)	CP-2 (CR)	CP-3 (CR)	CP-4 (CR)	CP-5 (CR)	CP-6 (CR-ELU-CE)
7	Superior	-4,92	-4,37	-4,20	-4,20	-4,20	-5,46
7	Inferior	0,24	0,13*	-0,15	-0,15	-0,15	0,34
8	Superior	-1,75	-1,63	-1,63	-1,63	-1,63	-1,93
8	Inferior	-4,18	-3,88	-3,88	-3,88	-3,88	-4,60

* - Valores Fora dos Limites

Limite de Tensões nas Seções - Combinação Rara (CR)

Tensão Mínima de Compressão para Combinação Padrão CP-1 (CR): -12,98 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR): -14,40 MPa
 Tensão Mínima de Compressão para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): -15,15 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinação Padrão CP-1 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 2,33 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-2 (CR) a CP-5 (CR) Para se Considerar Protensão Completa: 0,00 MPa
 Tensão Máxima de Tração para Combinações Padrão CP-6 (CR-ELU-CE): 2,80 MPa

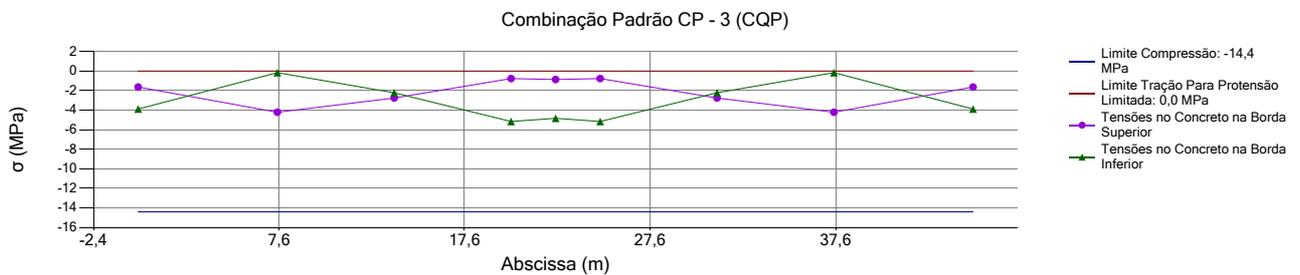
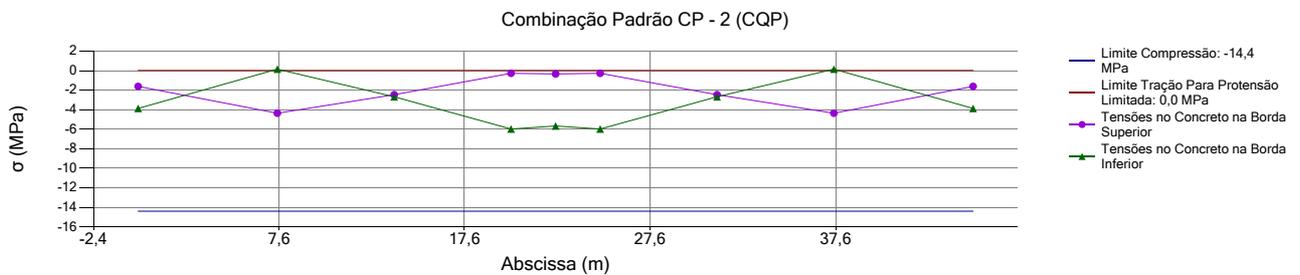
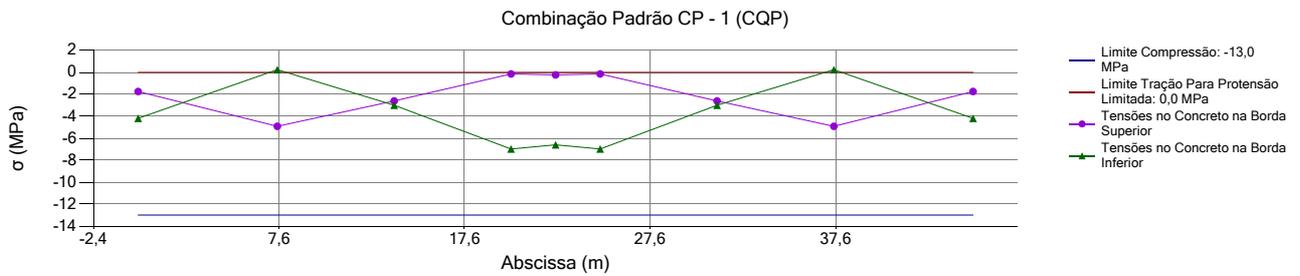
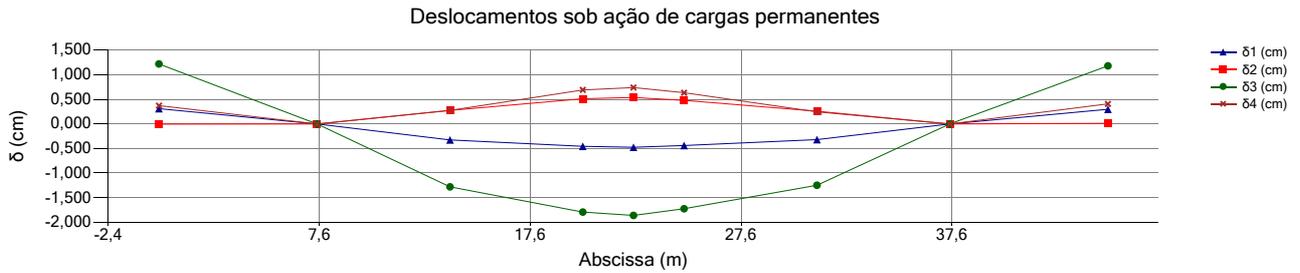
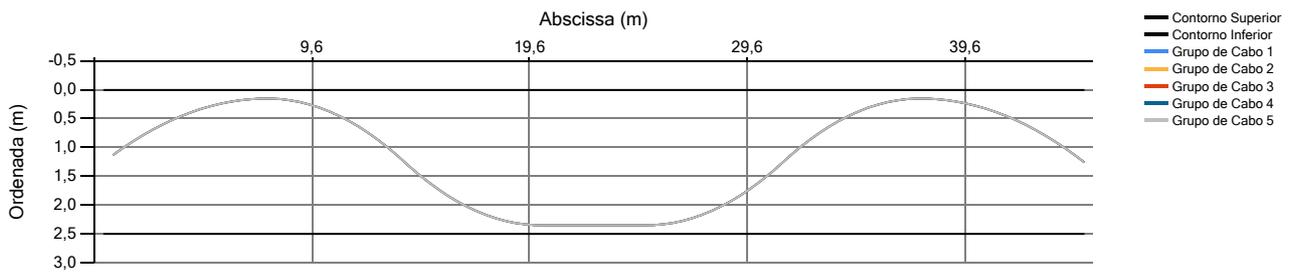
Classificação Quanto ao Grau de Protensão (NBR-6118/2007)

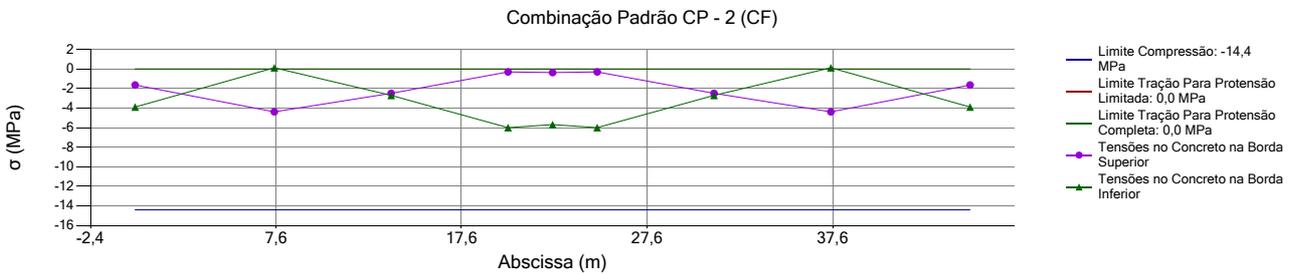
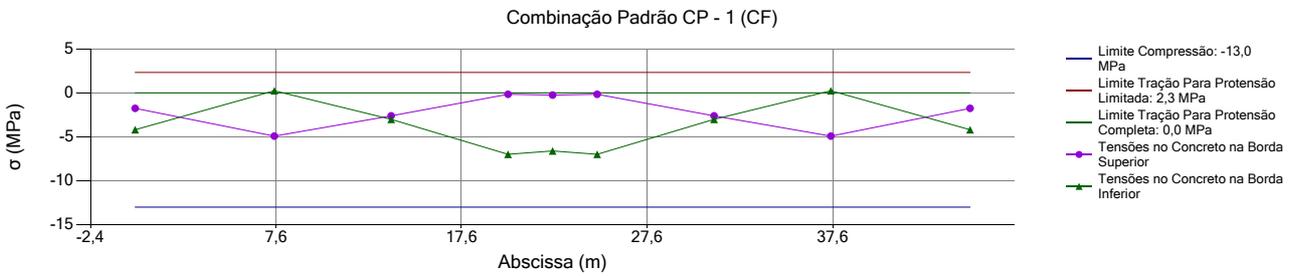
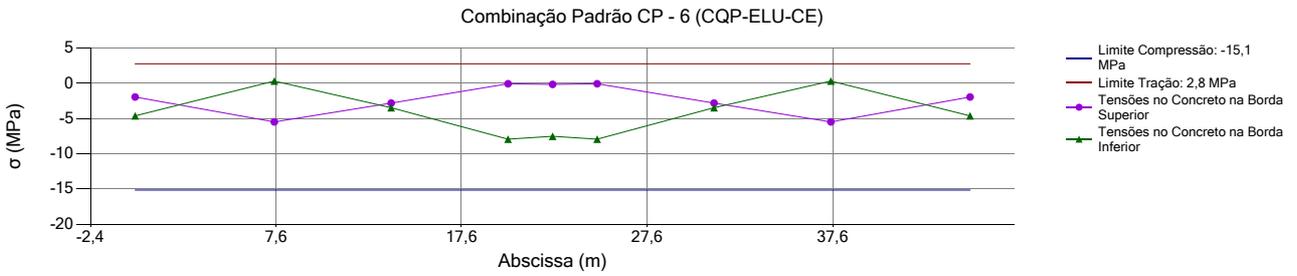
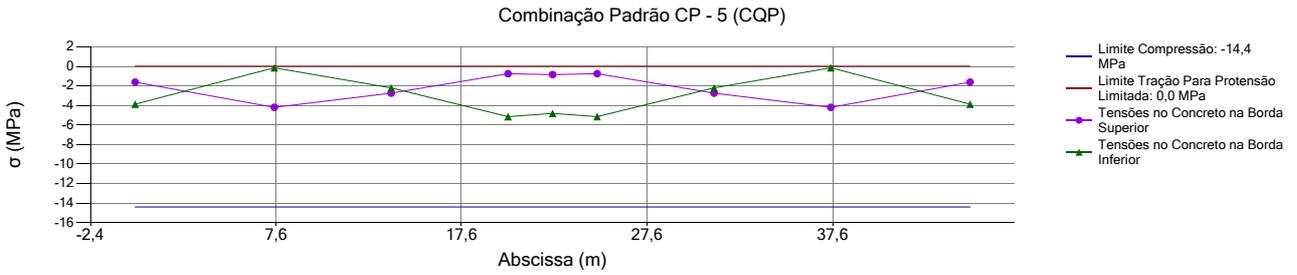
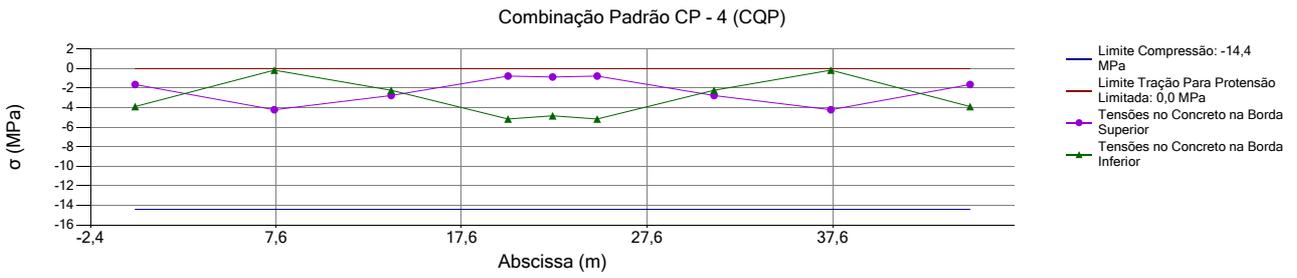
Tipo de Concreto Estrutural	Exigências Relativas à Fissuração	Combinação de Ações em Serviço a Utilizar	Status da Verificação
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Combinação Frequente (CF)	Efetuar Verificação
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão Limitada)	ELS-F	Combinação Frequente (CF)	Não Atendida
	ELS-D	Combinação Quase Permanente (CQP)	Não Atendida
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)	ELS-F	Combinação Rara (CR)	Não Atendida
	ELS-D	Combinação Frequente (CF)	Não Atendida

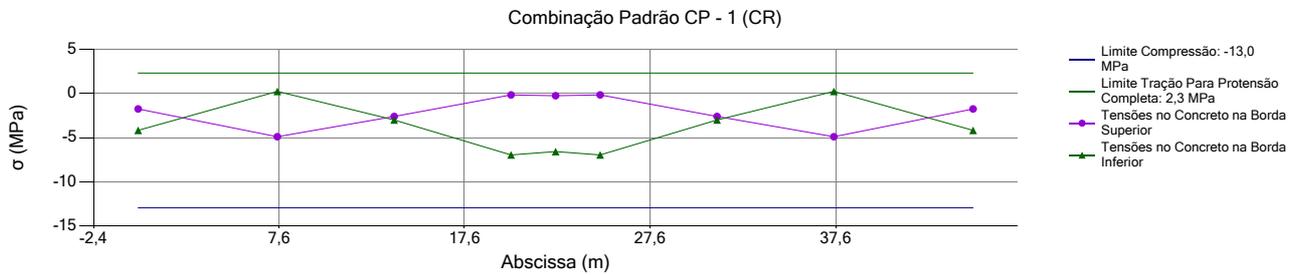
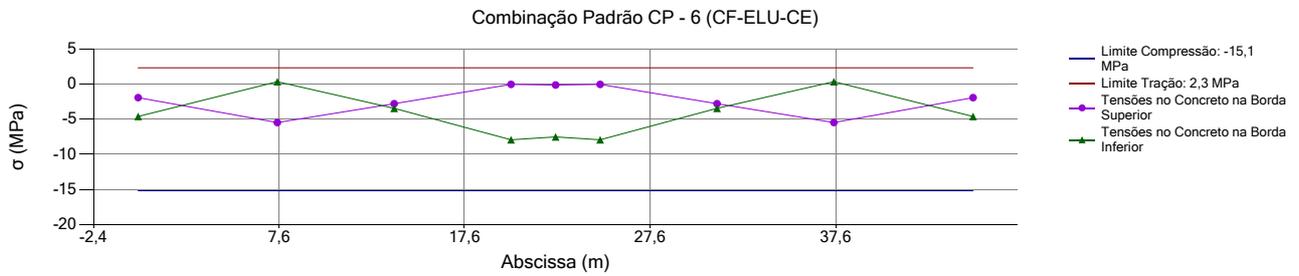
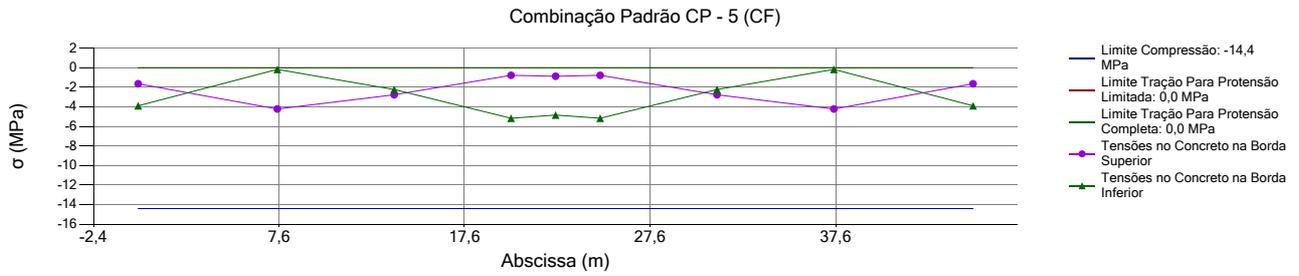
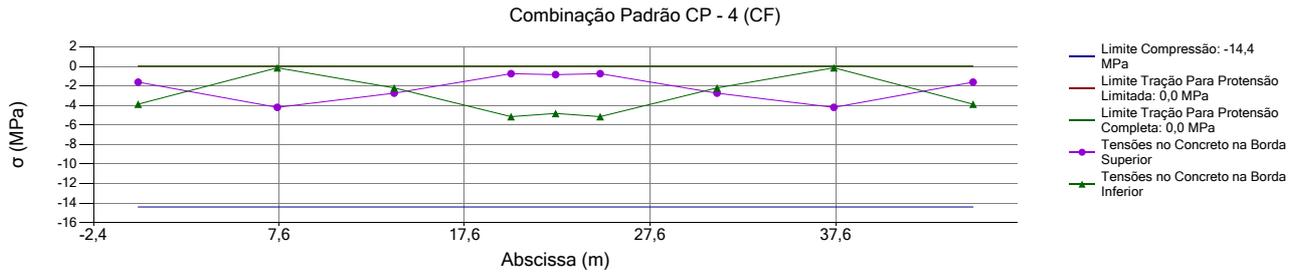
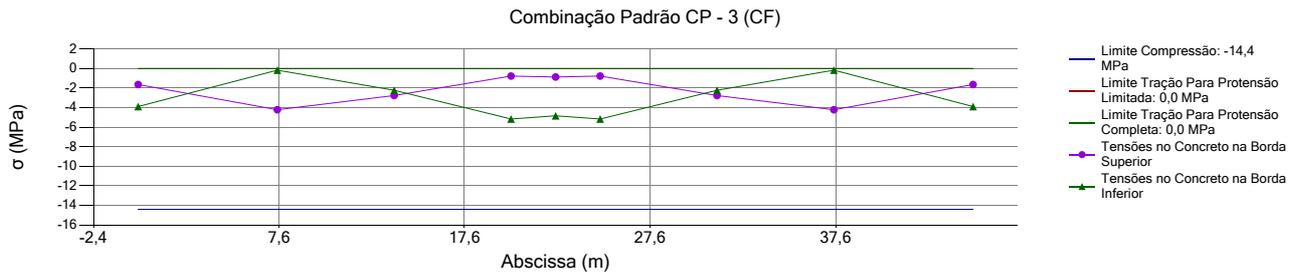
A estrutura deve ser verificada segundo os requisitos prescritos pela NBR-6118/2007 para Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)

Deslocamentos sob Ação de Cargas Permanentes

Seção	δ1 - Desl. Iniciais sem Prot. (cm)	δ2 - Des. Iniciais com Prot. (cm)	δ3 - Des. Finais sem Prot. (cm)	δ4 - Des. Finais com Prot. (cm)
0	0,31	0,00	1,22	0,37
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,32	0,27	-1,28	0,27
3	-0,45	0,51	-1,79	0,69
4	-0,47	0,54	-1,85	0,74
5	-0,44	0,48	-1,72	0,63
6	-0,32	0,26	-1,24	0,25
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,30	0,01	1,18	0,41







Avaliação das Tensões no Estado Limite de Serviço em Seções de Concreto Protendido - T.P.B - V1.0 - 2013

Nome do Arquivo: NBR 6118.txt

