

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia de Estrutura
Curso de Especialização de Estruturas de Concreto e Aço

Flávia Belisário Dantas

LAJE PROTENDIDA NERVURADA COM VIGAS FAIXAS

Belo Horizonte

2019

Flávia Belisário Dantas

Laje protendida nervurada com vigas faixas

Trabalho de conclusão do Curso apresentada ao Departamento de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Estruturas.

Orientador: Prof. Sebastião Salvador Real Pereira

Belo Horizonte
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
*Curso de Especialização em Análise e Dimensionamento de
Estruturas de Concreto Armado e Aço*

ATA DA DEFESA

“Lajes Protendida Nervurada com Viga Faixa”

FLÁVIA BELISÁRIO DANTAS

Trabalho Final defendido perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço”

Aprovada em 20 de novembro de 2019.

Por:

Prof. Dr. Sebastião Salvador Real Pereira
Avaliador 1 – Orientador

Nota: 70

Prof. Ms. Pedro Vianna Pessoa de Mendonça
Avaliador 2

Nota: 70

Dedico aos meus filhos Bernardo e Arthur, amor sem limites.

RESUMO

A procura de soluções onde trazem grandes benefícios como redução de materiais, custo, rapidez e versatilidade nas aplicações é crescente na construção civil. Com a grande virtude de apresentarem uma série de vantagens, a laje nervurada protendida tem se mostrado excelente solução para pavimentos de edificações. Neste trabalho aborda este tipo de laje demonstrando as características e opção construtiva, funcionamento e comportamento estrutural, processo de cálculo usualmente empregado e exemplo de cálculo de uma laje nervurada protendida.

Palavras-chaves: construção civil, laje nervurada, protendida, estrutural.

ABSTRACT

Looking for solutions bring great benefits such as material reduction, cost, speed and versatility in applications is growing in construction. With the great virtue of presenting a number of advantages, the prestressed ribbed slab has proven to be an excellent solution for building floors. In this article explains this type of slab demonstrating the characteristics and constructive option, operation and structural behavior, calculation process and example of calculation of a prestressed ribbed slab.

Keywords: civil construction, ribbed slab, prestressed, structural.

LISTA DE SÍMBOLOS

F_{tc} - Força transversal de curvatura

P - Força de protensão no cabo

f_{la} - Força longitudinal de atrito

θ - Ângulo central, ângulo de incidência do cabo nas extremidades

D_s - Trecho infinitesimal de cabo

P_o - Força de protensão junto a ancoragem, antes da cravação

e - Excentricidade do cabo em relação ao CG da seção

ϵ - Deformação específica

T_p - Tensão no cabo de protensão

E_p - Módulo de elasticidade da armadura de protensão

A_p - Área da seção transversal da armadura de protensão

l - Comprimento de cabo, distância

E_c - Módulo de elasticidade do concreto

ap - Coeficiente de equivalência entre os módulos E_p e E_c

M_g - Momento fletor devido as cargas permanentes

e_p, e_i - Excentricidade do cabo em relação ao CG da seção

I_c - *Momento* de inercia a flexão da seção transversal de concreto

A_c - Área da seção transversal do concreto

N(x) - Força Normal na seção de concreto (da barra)

V(x) - Força Cortante na seção de concreto (da barra)

M(x) - Momento fletor na seção de concreto (da barra)

M_p - Momento total de protensão

M_{iso} - Momento isostático de protensão

M_{hip} - Momento hiperestático de protensão

f - Flecha do cabo

P_y - Componente segundo `y` da força de protensão na seção de concreto

P_x - Componente segundo `x` da força de protensão na seção de concreto

P_z - Componente segundo `z` da força de protensão na seção de concreto

F_{tc} - Resultante da força transversal de curvatura

F_{la} - Ângulo de deflexão

L - Vão da viga

CG - Centro de gravidade da seção transversal

CC - Centro de cisalhamento da seção transversal

X, Y, Z - Eixos globais

N_x, V_y, V_z - Esforços Axial e Cortantes segundo os eixos locais das barras

M_x, M_y, M_z - Momentos fletores segundo os eixos locais das barras

e_x, e_y, e_z - Excentricidades do cabo em relação ao CG da seção

LISTA DE FIGURAS

Figura I – Representação da propensão.....	07
Figura II – Representação da propensão.....	07
Figura III - Esquema de esforços aplicados numa viga bi apoiada.....	08
Figura IV - Trecho de cabo parabólico	09
Figura V - Vigas.....	10
Figura VI - Desenho da Laje Protendida com nervuras em faixas.....	13
Figura VII - Detalhe.....	13
Figura VIII - Nervura.....	14
Figura IX - Seção simplificada.....	14
Figura X - Esforço permanente 1.....	15
Figura XI - Esforço permanente 2.....	16
Figura XII – Acidentais 1.....	16
Figura XIII – Acidentais 2.....	16
Figura XIV – Pré-dimensionamento.....	17
Figura XV - Traçado das Cordoalhas.....	17
Figura XVI – Carregamento equivalente.....	18
Figura XVII - Vãos.....	18
Figura XVIII - Vãos.....	19
Figura XIX – Carregamento equivalente.....	20
Figura XX - Armadura.....	20
Figura XXI – ELU.....	21
Figura XXII - Armadura Positiva de Nervuras.....	22
Figura XXIII - Armadura Positiva de Nervuras.....	22
Figura XXIV - Vista genérica cabo em nervura.....	23
Figura XXV – Armadura Negativa.....	24
Figura XXVI - Armadura Negativa.....	24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	05
1.1 Objetivos.....	06
1.2 Metodologia.....	08
1.2.1 <i>Disposição dos Cabos nos carregamentos equivalentes.....</i>	<i>11</i>
<u>1.2.1.1 <i>Viga com Cabo reto com excentricidade constante.....</i></u>	<u>11</u>
1.3 Cabo parabólico passando pelo C.G das Seções extremas.....	11
1.3.1 <i>Trechos de cabo composto de duas parábolas com vértice em comum.....</i>	<i>11</i>
<u>1.3.1.1 <i>Trechos de cabo parabólico qualquer com uma das extremidades com derivada nula.....</i></u>	<u>12</u>
2 EXEMPLO DE CÁLCULO DE LAJE.....	12
2.1 Seção da nervura Atex70.....	14
2.1.1 <i>Seção Simplificada</i>	<i>14</i>
<u>2.1.1.1 <i>Carregamento ou ações</i></u>	<u>15</u>
2.1.2 Cálculo dos Esforços.....	15
2.2 Pré-dimensionamento	16
2.2.1 <i>Pré-dimensionamento Ap- Equilíbrio 100%g</i>	<i>16</i>
2.3 Determinação da carga de balanceamento e traçado básico das cordoalhas.....	17
2.3.1 <i>Cálculo do carregamento equivalente.....</i>	<i>17</i>
2.3.2 <i>Carregamento Equivalente.....</i>	<i>19</i>
2.4 Verificação das tensões.....	20
2.4.1 Armadura mínima.....	20
2.5 ELU – Verificação NBR 6118.....	21
3 DETALHAMENTO DA LAJE NERVURADA E VIGA FAIXA.....	22
3.1 Armação positiva.....	22
3.1.1 <i>Detalhe dos cabos.....</i>	<i>23</i>
3.1.1.1 Armação negativa.....	24
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
Referências.....	26
Anexos.....	27

1 INTRODUÇÃO

Os conceitos teóricos e o emprego da técnica de protensão no campo da Engenharia Civil surgiram por volta de 1924, com o francês Eugene Freyssinet. Porém, seu emprego em sistemas estruturais de edifícios, principalmente no Brasil, consiste em uma alternativa relativamente recente e pouco difundida.

Sabe-se que o desempenho do concreto à compressão é ótimo, mas que quando solicitado à tração apresenta pequena resistência, equivalente a cerca de 10% de sua resistência à compressão. Essa constatação foi uma das razões pela qual projetistas começaram a empregar concreto e aço, combinados, para explorar o bom desempenho do concreto frente às solicitações de compressão e o bom desempenho do aço para solicitações de tração, dando origem ao que conhecemos por concreto armado.

Embora o concreto armado seja largamente a solução mais empregada em estruturas de edifícios, há um significativo desperdício de material, já que na parcela tracionada da seção o concreto não colabora para a resistência da peça. Entretanto, se as barras de aço conseguirem comprimir o concreto, fazendo com que ele trabalhe predominantemente comprimido, obtém-se um ganho considerável de resistência e aproveitamento dos materiais.

A proposta da protensão é introduzir esforços prévios na peça de concreto, capazes de fazer com que esta trabalhe total ou predominantemente comprimidos. Em outras palavras, a protensão pode ser vista como um conjunto de cargas equivalentes de sentido contrário aos carregamentos que atuam tradicionalmente na laje, anulando parte desses esforços. A intensidade dessas cargas equivalentes está diretamente relacionada ao valor da força de protensão, ao vão da peça e à excentricidade do cabo.

Com isso, tende-se a eliminar ou reduzir as tensões de tração atuantes na peça protendida, à medida que limita a fissuração e as deformações, fazendo com que praticamente toda a seção de concreto colabore para sua resistência, enquanto no

concreto armado, normalmente tem-se apenas um terço da seção de concreto trabalhando para resistir aos esforços solicitantes.

Estruturas protendidas também costumam ser mais duradouras, porque a protensão possibilita longa vida útil aos seus elementos pelo fato de limitar e controlar deformações e fissuração, proporcionando estruturas com baixa ou nenhuma necessidade de manutenção.

Dessa forma, fica evidente que o emprego da protensão consegue proporcionar inúmeros benefícios, podendo-se resumir em: maior durabilidade para a estrutura pela limitação de fissuração, estruturas com maiores vãos livres, redução do peso e da quantidade de materiais por utilizar materiais com maior resistência.

1.1 Objetivos

O presente trabalho será estudo de uma das alternativas utilizadas para representação da protensão em um projeto de uma estrutura de concreto, o método a utilizar será de Carga equivalente de protensão.

Consiste em representar a ação protensão por um conjunto de cargas externas que são denominadas equivalentes de protensão.

As cargas equivalentes de protensão devem, portanto, ser tais que quando atuam na estrutura provocam esforços e deslocamentos idênticos aos gerados pelo aço de protensão.

A obtenção da carga equivalente de protensão baseia-se na própria conceituação física da protensão: "Quando estiramos um cabo, este tende naturalmente a tomar a forma retilínea. Todo ponto que constituir um obstáculo no sentido de impedir a sua retificação receberá então uma ação correspondente a uma força que é proporcional ao grau de mudança de direção imposta ao cabo".

Figura I – Representação de protensão

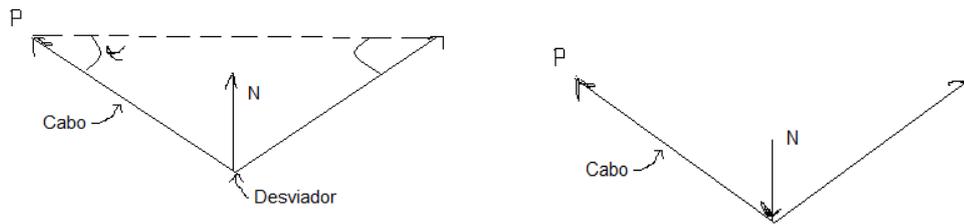
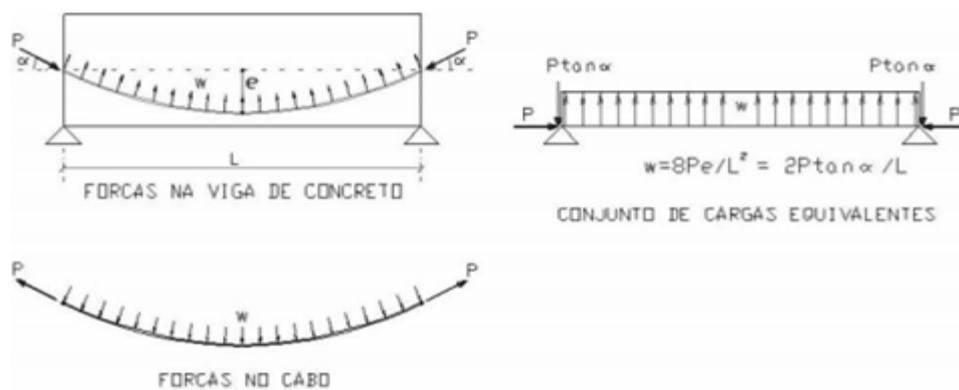


Figura II – Representação de protensão



Portanto todo ponto de mudança de direção do cabo será um ponto de aplicação de carga no concreto. Estes pontos poderão ser discretos, nos casos dos cabos poligonais, gerando cargas concentradas nos desviadores, ou contínuas, no caso dos cabos curvos gerando cargas distribuídas.

Além dos pontos de mudança de direção o cabo também transmite ao concreto através das ancoragens, portanto nas suas extremidades, uma carga concentrada de valor idêntico ao da força que traciona, mera aplicação do princípio de ação e reação. Temos então:

Cargas Equivalentes de Protensão = Força de Desviação + Forças nas Ancoragens

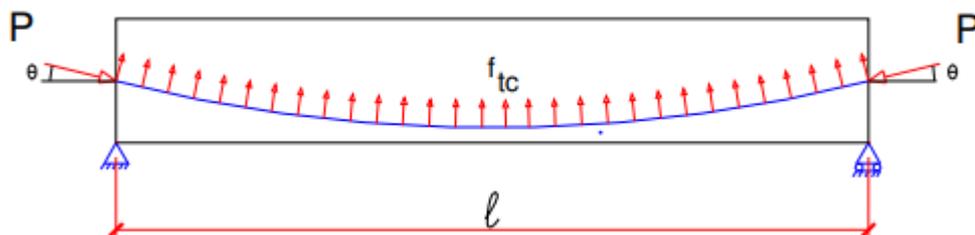
Convém salientar alguns aspectos importantes ligados a representação de protensão através de cargas equivalentes:

- I. Tratando a protensão como um carregamento podemos facilmente incorporá-la aos processos modernos de análise estrutura via softwares para estruturas reticuladas ou de elementos finitos. A protensão passa a ser apenas um caso a mais de carregamento

- II. As cargas equivalentes só dependente do traçado do cabo . É possível então projetar um traçado que produza cargas equivalentes que se oponha na sua forma ao carregamento real propriamente dito. Pode-se assim gerar um carregamento de protensão de forma a equilibrar uma parcela de carga total.
- III. Ao carregamos a estrutura com carga equivalente obtemos diretamente em uma única análise todos os efeitos da protensão, deslocamento e esforços seccionais, tanto para as estruturas isostáticas como para as hiperestáticas.
- IV. Como o conjunto cabo- concreto encontra-se em equilíbrio estáticos, havendo ou não vinculação na estrutura, verifica-se que as cargas equivalentes devem se constituir obrigatoriamente em um carregamento auto equilibrado. Assim sendo, o carregamento da protensão não gerará reações de apoio nas estruturas isostáticas e provocará reações auto equilibradas nas estruturas hiperestáticas. Os esforços produzidos na estrutura apenas por estas reações auto equilibradas constituem o que se chama de esforço secundários ou hiperestáticos de protensão.

1.2 Metodologia

Figura III – Esquema de esforços aplicados numa viga bi apoiada através da protensão com $f_{ia} = 0$



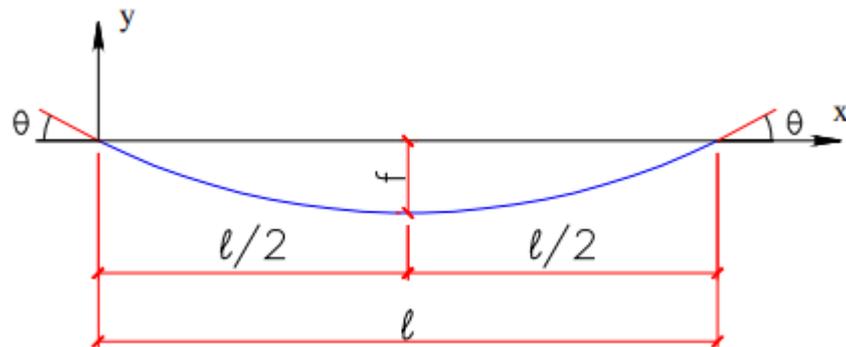
Considerando um cabo com desenvolvimento parabólico. A equação da parábola do segundo grau é:

$$y = ax^2 + bx + c$$

$$\text{Para } x = 0$$

$$y = 0 \rightarrow c = 0$$

Figura IV – Trecho de cabo parabólico



Para $x = \frac{l}{2}$ TEMOS :

$$y = -f \rightarrow -f = \frac{al^2}{4} + \frac{bl}{2} \quad (1.3.1)$$

Para $x = l$ TEMOS :

$$y = 0 \rightarrow al^2 + bl = 0 \quad (1.3.2)$$

Portanto a equação da excentricidade do cabo, conforme a referência da Figura IV é:

$$y(x) = \frac{4fxl^2}{l^2} - \frac{4fx}{l} \quad (1.3.3)$$

Assumindo que **P** é a força de protensão constante ao longo do cabo e que a curva é abatida o suficiente para que possamos considerar $P_x = P$ ou seja, que a componente horizontal da força de protensão é aproximadamente igual a força de tração no cabo, temos:

$$M(x) = P \cdot \left(\frac{4fx^2}{l^2} - \frac{4fx}{l} \right) \quad (1.3.4)$$

Sabendo que $d^2 M / dx^2 = q$ (1.3.5), onde q é uma carga qualquer uniforme distribuído, temos:

$$ftc = \frac{8Pf}{l^2} \quad (1.3.5)$$

Onde ftc é a carga distribuída equivalente, atuando na direção vertical. É interessante notar que na figura III a componente vertical **Py** das forças **P** que atuam nas extremidades seria, normalmente, dada por:

$$Py = P \cdot \text{Sen } \Theta \quad (1.3.6)$$

Mas se analisarmos o equilíbrio das cargas na viga, temos:

$$Py = ftc \cdot \frac{l}{2} = \frac{8Pf}{l^2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{4Pf}{l} \quad (1.3.7)$$

Observando a parábola da figura IV, temos:

$$\text{Para } x = l : \frac{dy}{dx} = tg \theta \text{ então } tg \theta = \frac{4f}{l} \quad (1.3.8)$$

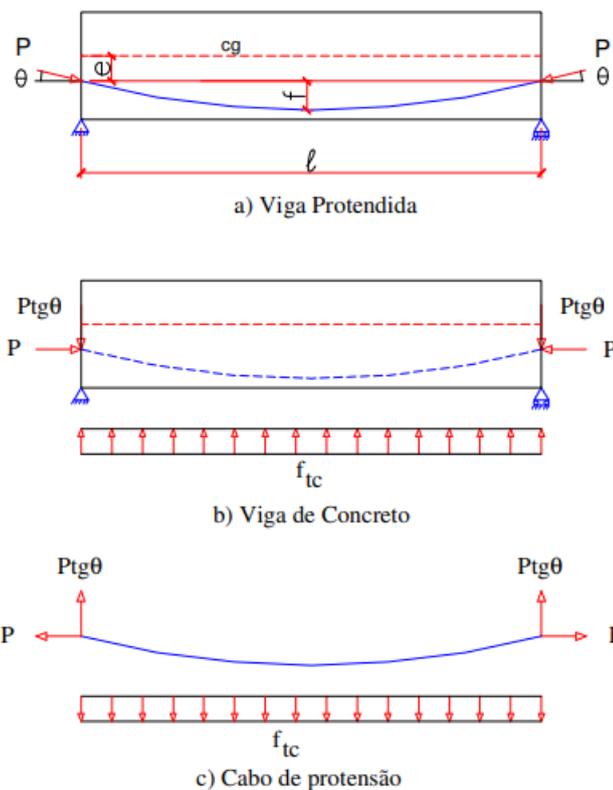
O que nos leva a igualdade:

$$Py = P \cdot tg \theta \quad (1.3.9)$$

A explicação para ter chegado em dois valores diferentes de Py (eq 1.3.7 e 1.3.9) está na aproximação que quando calculamos a carga distribuída f_{tc} supondo a vertical e não perpendicular a trajetória do cabo como de fato ela é.

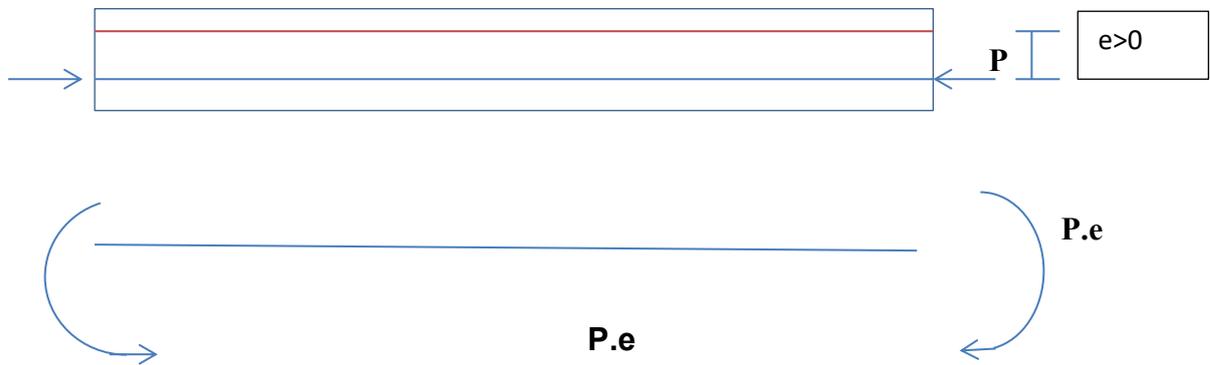
Como este processo é indicado para casos em que a trajetória do cabo é abatida, o ângulo θ é pequeno e então $tg \theta \sim \sin \theta$. Porém, para haver o equilíbrio exato das cargas, devemos sempre utilizar $Py = P \cdot tg \theta$, conforme (1.3.9.)

Figura V - Vigas

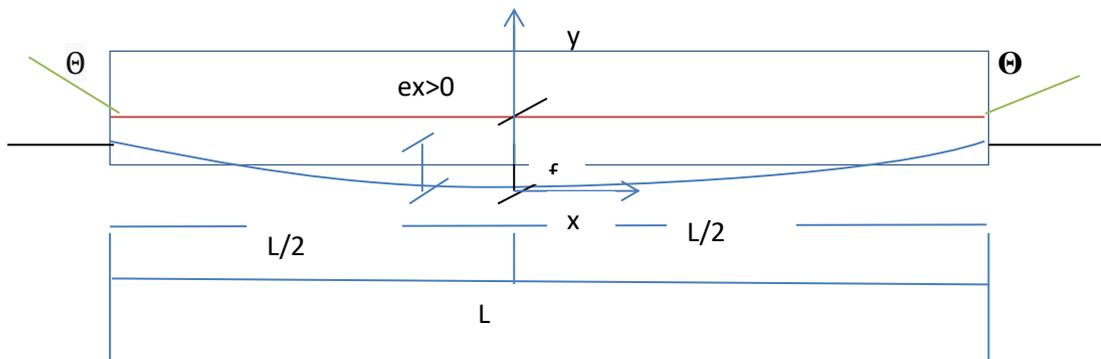


1.2.1 Disposição dos Cabos nos carregamentos equivalentes

1.2.1.1 Viga com Cabo reto com excentricidade constante



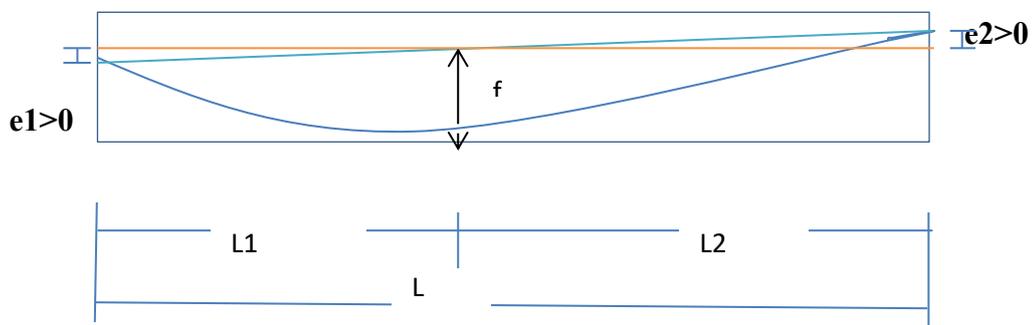
1.3 Cabo parabólico passando pelo C.G das Seções extremas



Para $X = L/2$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{4f}{l}$$

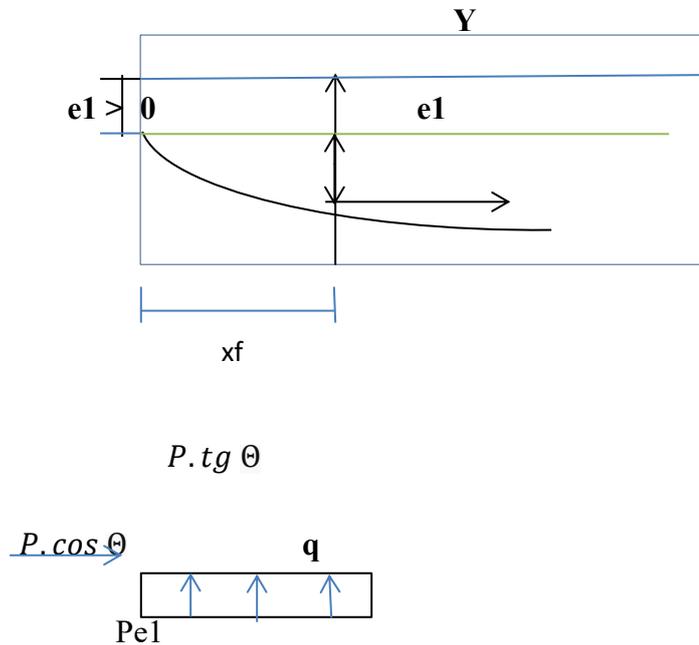
1.3.1 Trechos de cabo composto de duas parábolas com vértice em comum



Para $L_1 = L_2$

$$q = \frac{8Pf}{l^2}$$

1.3.1.1 Trechos de cabo parabólico qualquer com uma das extremidades com derivada nula



Igualando o momento do carregamento equivalente ao momento de protensão vem:

$$-Pe1 - P \operatorname{tg} \theta \cdot xf + q \cdot xf^2/2 = -P(f+e1) \quad (\theta > 0)$$

$$q = P(-f + \operatorname{tg} \theta \cdot xf) / xf^2/2$$

$$q = 2P(-f + \operatorname{tg} \theta \cdot xf) / xf^2$$

$$\text{Como } \operatorname{tg} \theta = \frac{2f}{xf} \text{ vem :}$$

$$q = 2P[-f + 2f] / xf^2$$

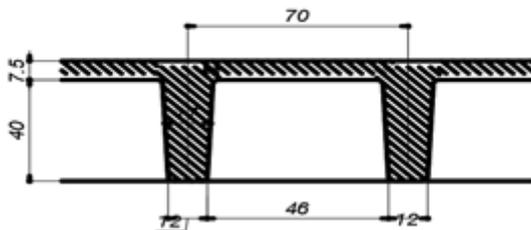
$$q = 2Pf / xf^2 = 8P f / (2xf)^2$$

2 EXEMPLO DE LAJE CÁLCULO

O desenvolvimento do trabalho foi utilizando laje nervurada com forma ATEX, com utilização de vigas faixas. O modelo de cálculo foi utilizado o mesmo exemplo da laje em viga em faixa da apostila do curso de Concreto Protendido. Conforme desenho descrito abaixo.

2.1 Seção da Nervura Atex 70

Figura VIII - Nervura



Largura da Nervura:

- Superior: 22 cm
- Média: 17 cm
- Inferior: 12 cm
- $h_f = 7,5$ cm
- $d_s = 40$ cm

$H_t > 3,5b \rightarrow 3,5 \times 17 = 59,5$ adotar $h_t = 47,5$ cm

$S = 70$ cm $\rightarrow h_f > 70/12 = 5,83 \rightarrow$ adotar 7,5 cm

Propriedades dos materiais

Concreto:

- $f_{ck} = 30$ Mpa;
- $E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$ (módulo de elasticidade secante em MPa);
- f_{ckj} = resistência característica à compressão do concreto na idade de aplicação da protensão.
- Recobrimento: 4 cm para armadura passiva;
4,5 cm para armadura ativa.

Aço de protensão:

- Cordoalha de 7 fios – Engraxada e Plastificada;
- CP 190 RB 7 - $\phi = 12,7$ mm; Área = 100 mm²; $E_p = 195.000$ MPa (varia com o rolo).

2.1.1 Seção simplificada

Figura IX - Seção simplificada



$7 \times 17 \times 2 + \text{faixa } (80) + 17 \text{ nervura extremidade} = 335 \text{ cm}$

Area = 22.400 cm²

$YCG = \frac{9000 \times 43,75 + 13.400 \times 20}{9000 + 13400} = 29,5 \text{ cm}$

$I = 4.865.730 \text{ cm}^4$

$W_s = 270.318 \text{ cm}^3$

$W_I = 164.940 \text{ cm}^3$

Espessura = $\frac{12 \times 12 \times 0,075 + 13.400(12 + 12 - 3,35)}{12 \times 12} = 0,267 \text{ cm}$

2.1.1.1 Carregamentos ou ações

Cargas permanentes:

- Peso próprio: = $0,267 \times 25 \text{ KN} = 6,68 \text{ KN/m}^2$
- Revestimento = $1,5 \text{ KN/m}^2$
- Alvenarias = $2,5 \text{ KN/m}^2$

Total permanentes = $10,68 \text{ KN/m}^2$

Sobrecargas acidentais: 5 KN/m^2

Carga Total = $15,68 \text{ KN/m}^2$

2.1.2 Cálculo dos Esforços

a) Permanentemente:

Figura X – Esforço permanente 1

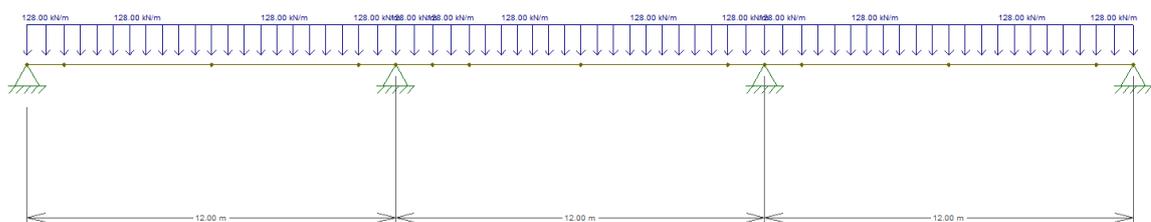
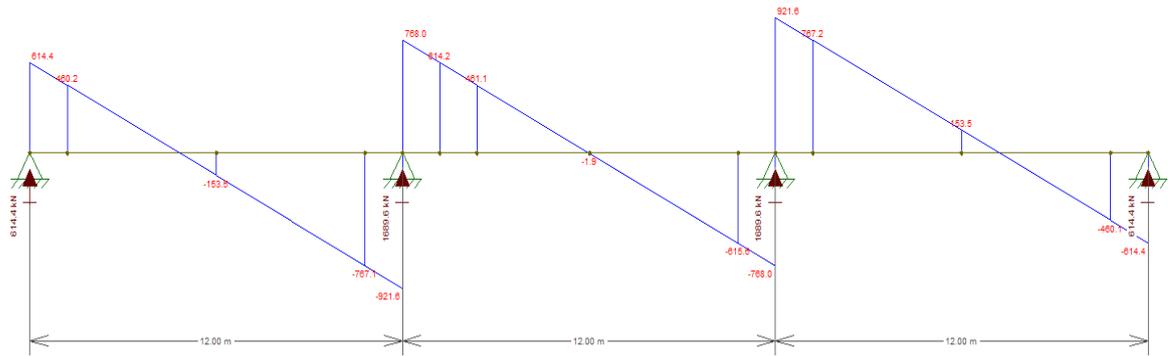


Figura XI - Esforço permanente 2



b) Acidentais:

Figura XII – Acidentais 1

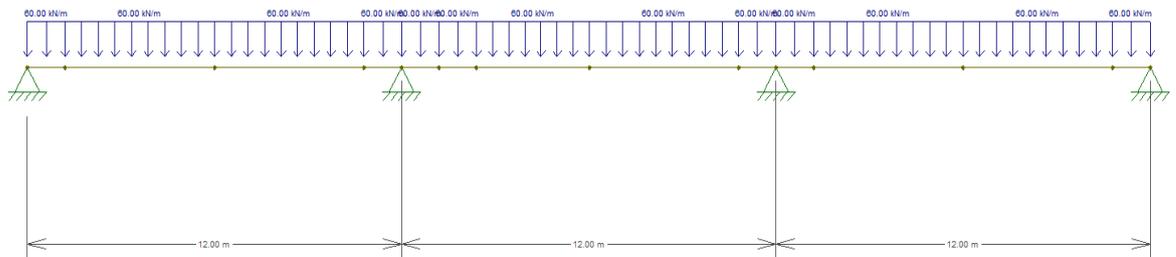
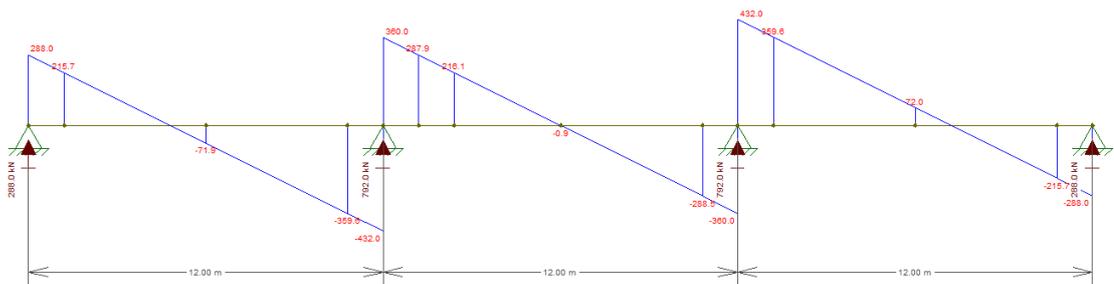


Figura XIII – Acidentais 2

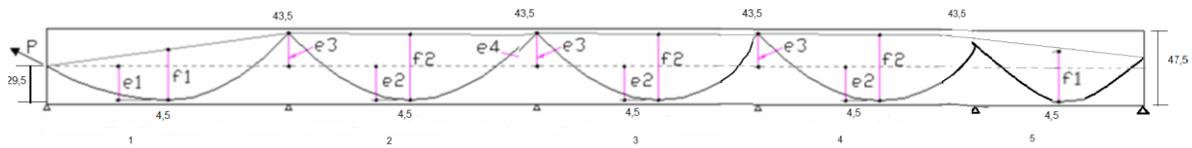


2.2 Pré-dimensionamento

M_{max}
 V_{max}
 Armadura Simples

2.2.1 Pré-dimensionamento A_p – Equilíbrio 100 % g

Figura XIV – Pré-dimensionamento

Vão 1 e 5

$$f_1 = (29,5 + 43,5) \cdot \frac{4,5}{2} = 32 \text{ cm}$$

$$P = \frac{128 \times 12^2}{8 \times 0,32} = 7200 \text{ KN} \rightarrow 60 \varnothing 12,7$$

Vão 2 e 4

$$f_2 = 43,5 - 4,5 = 39 \text{ cm}$$

$$P = \frac{128 \times 12^2}{8 \times 0,32} = 5907 \text{ KN} \rightarrow 50 \varnothing 12,7$$

2.3 Determinação da carga de balanceamento e traçado básico das cordoalhas:

Vão 2 e 4

$$Q_p = \frac{8 \times 120 \times 50 \times 0,39}{12^2} = 130 \text{ kN / m}$$

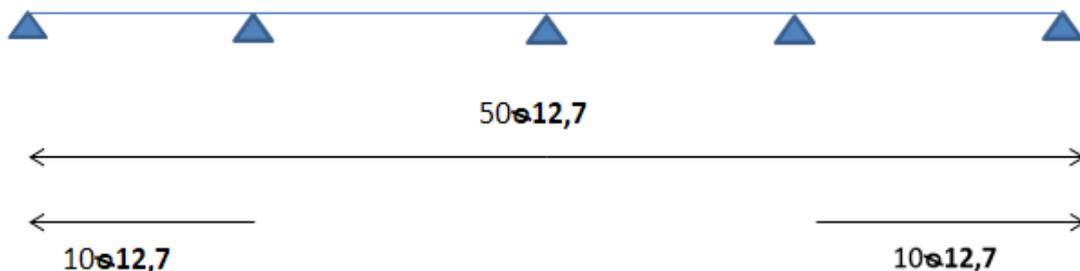
Vão 1 e 5

$$P = \frac{128 \times 12^2}{8 \times 0,32} = 7200 \text{ KN} \rightarrow 60 \varnothing 12,7$$

$$f = \frac{128 \times 12^2}{8 \times 120 \times 60} = 0,32 \text{ m}$$

Figura XV – Traçado das Cordoalhas

Traçado das Cordoalhas



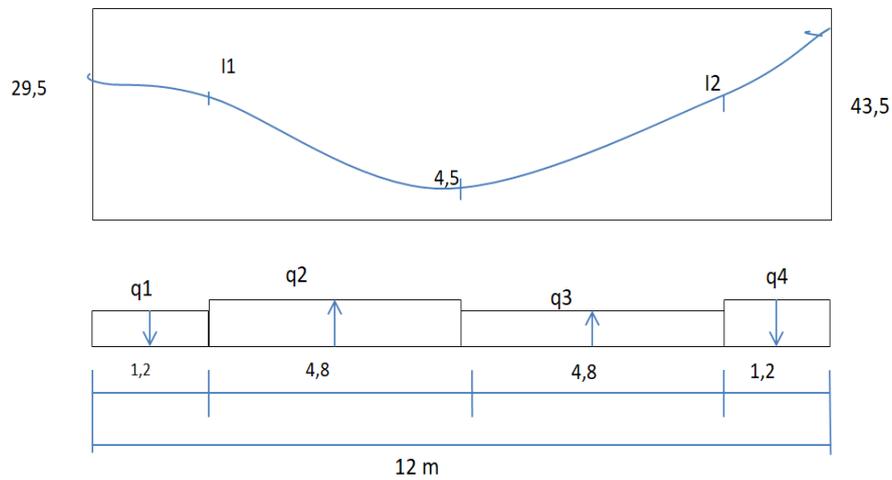
2.3.1 Cálculo do carregamento equivalente

Vão 1 e 5

$$P = 60 \times 120 = 7200 \text{ KN}$$

Figura XVI – Carregamento Equivalente

Carregamento Equivalente



$$y_{l_1} = 29,5 - \frac{1,2}{6} (29,5 - 4,5) = 24,5 \text{ cm}$$

$$y_{l_2} = 43,5 - \frac{1,2}{6} (43,5 - 4,5) = 37 \text{ cm}$$

$$q_1 = \frac{8 \cdot P \cdot f}{2Xf^2} = \frac{8 \times 7200 \times (0,295 - 0,245)}{(2 \times 1,2)^2} = 500 \text{ KN/m}$$

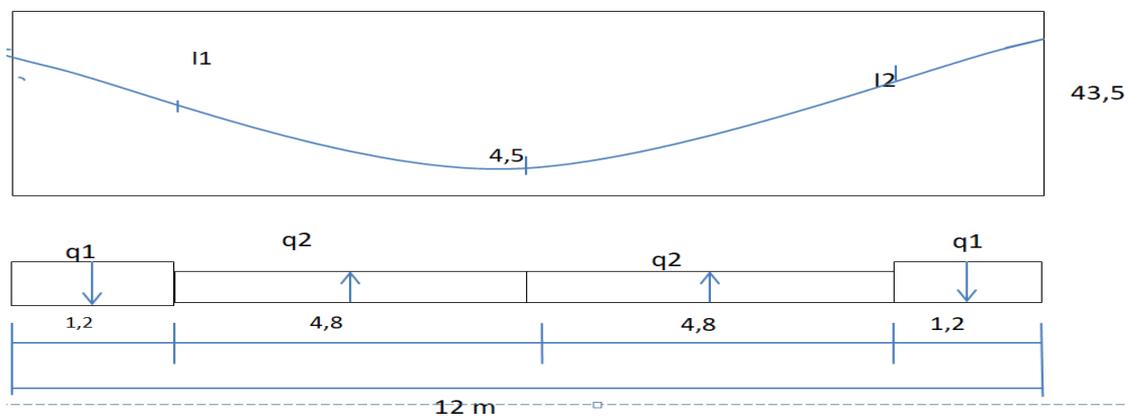
$$q_2 = \frac{8 \times 7200 \times (0,245 - 0,045)}{(2 \times 4,80)^2} = 125 \text{ KN/m}$$

$$q_3 = \frac{8 \times 7200 \times (0,37 - 0,045)}{(2 \times 4,80)^2} = 203 \text{ KN/m}$$

$$q_4 = \frac{8 \times 7200 \times (0,435 - 0,37)}{(2 \times 1,2)^2} = 650 \text{ KN/m}$$

Figura XVII - Vãos

Vão 2 e 4



$$y_{l1} = 43,5 - \frac{1,2}{6} (43,5 - 4,5) = 35,6 \text{ cm}$$

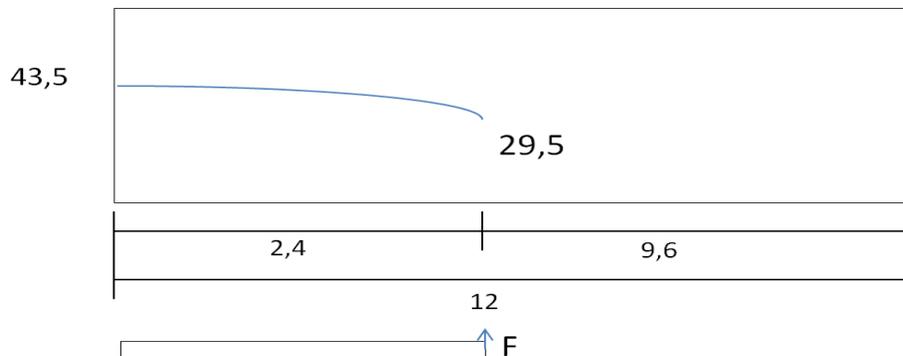
$$q_1 = \frac{8 \times 5907 \times (0,435 - 0,356)}{(2 \times 1,2)^2} = 648 \text{ KN/m}$$

$$q_2 = \frac{8 \times 5907 \times (0,356 - 0,04)}{(2 \times 4,80)^2} = 162 \text{ KN/m}$$

Vão 2 e 4

$$P = 10 \times 120 = 1200 \text{ KN}$$

Figura XVIII - Vãos



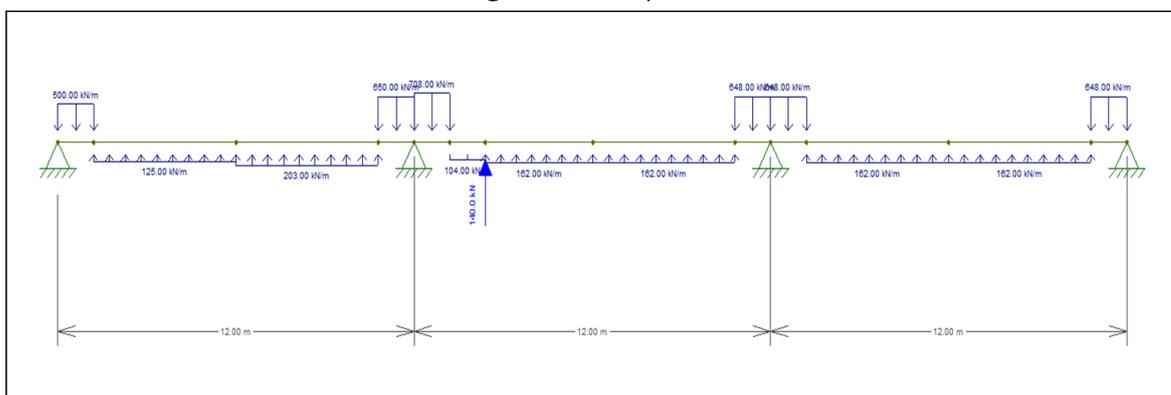
$$q_1 = \frac{8 \times 1200 \times (0,435 - 0,295)}{(2 \times 2,4)^2} = 58 \text{ KN/m}$$

$$F = \frac{P \times 4f}{L} = \frac{1200 \times 4 \times (0,435 - 0,295)}{4,8} = 140 \text{ KN}$$

2.3.2 Carregamento Equivalente

Figura XIX – Carregamento Equivalente

Carregamento Equivalente



2.4 Verificação das tensões

$$-X1 = -1920 - 900 + 1809 = -1011$$

$$\tau_s = \frac{-7200}{22400} + \frac{101100}{270318} = -0,052 \text{ KN/cm}^2$$

$$\tau_i = \frac{-7200}{22400} + \frac{101.100}{164.940} = -0,934 \text{ KN/cm}^2$$

$$-X2 = -1520 - 710 + 1686 = -544$$

$$\tau_s = \frac{-5907}{22400} + \frac{54400}{270318} = -0,06 \text{ KN/cm}^2$$

$$\tau_i = \frac{-5907}{22400} + \frac{54400}{164940} = -0,59 \text{ KN/cm}^2$$

$$-M1 = 1445 + 630 - 1519 = 556$$

$$\tau_s = \frac{-7200}{22400} + \frac{55600}{270318} = -0,527 \text{ KN/cm}^2$$

$$\tau_i = \frac{-7200}{22400} + \frac{55600}{164940} = -0,016 \text{ KN/cm}^2$$

$$-M3 = 930 + 440 - 1545 = -175 \text{ KN/cm}^2$$

$$\tau_s = \frac{-5907}{22400} - \frac{17500}{270318} = -0,33 \text{ KN/cm}^2$$

$$\tau_i = \frac{-5907}{22400} + \frac{17500}{164940} = -0,157 \text{ KN/cm}^2$$

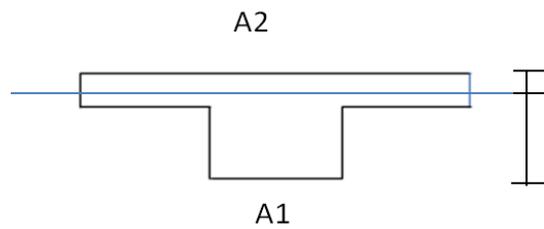
Tensão limite

$$\tau_c < 0,6 f_{ck} < 2,1 \text{ KN/cm}^2 \text{ (} f_{ck} \text{ 35 Mpa)}$$

$$\tau_t < 0,5 \sqrt{f_{ck}} < 0,296 \text{ KN/cm}^2$$

2.4.1 Armadura mínima

Figura XX - Armadura



- Momentos positivos:

$$-A1 = 335 \times 29,5 = 9.882,5 \text{ cm}^2$$

$$-A2 = 0,004 \times 9882,5 = 39,53 \text{ cm}^2$$

- Momentos negativos:

$$-A2 = 22400 - 9882,5 = 12.517 \text{ cm}^2$$

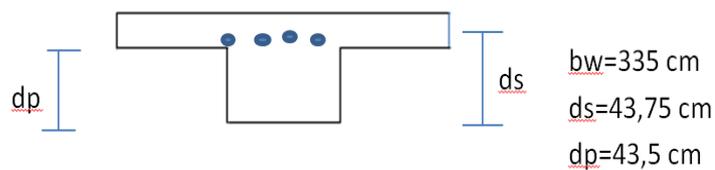
$$-As = 0,04 \times 12.517 = 50 \text{ cm}^2$$

2.5 ELU – Verificação NBR 6118

Figura XXI - ELU

$$M_{hip} = 50 \times 12 = 600 \text{ KN.m}$$

$$M_d = 1,4 (-1920 - 900) + 0,9 (600) = 3.408 \text{ KN.m}$$



$$R_c = \frac{0,85 \cdot 3,5 \cdot b_w \cdot Y}{1,4} = 711,87 \text{ y}$$

$$R_p = \frac{50 \times 120}{1,15} = 5.217 \text{ KN}$$

$$K_y^2 - K_y ds + R_p (ds - dp) + M_d = 0$$

$$355,94 y^2 - 31.144 y + 342104 = 0$$

$$y_1 = 12,87$$

$$y_2 = 74$$

$$R_c = 711,87 \times 12,8 = 9.100 \text{ KN}$$

$$R_s = 9100 - 5217 = 3883 \text{ KN}$$

$$A_s = \frac{3883}{43,48} = 89 \text{ cm}^2$$

3 DETALHAMENTO DA LAJE NERVURADA E VIGA FAIXA

3.1 Armação positiva

Figura XXII – Armadura Positiva de Nervuras

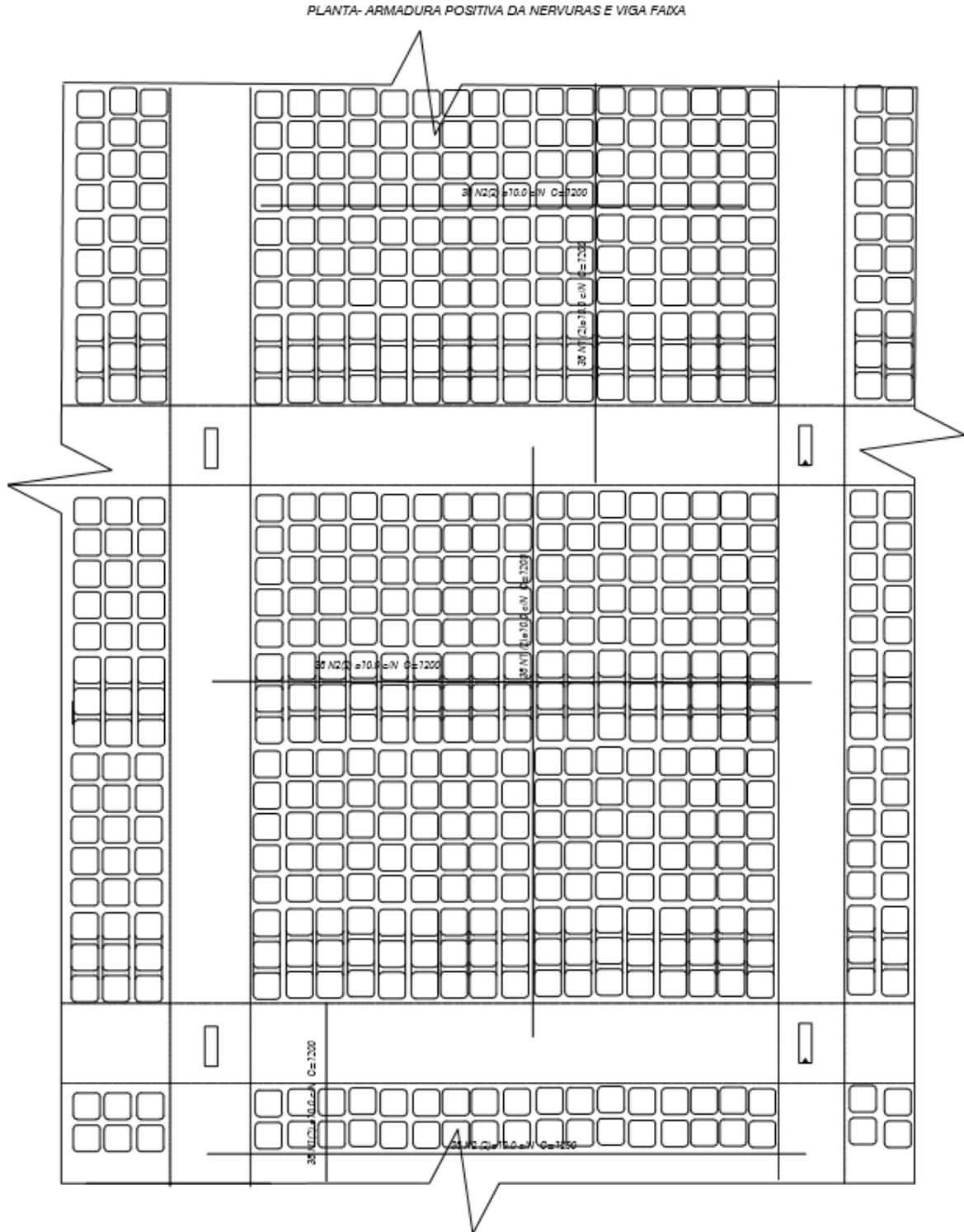
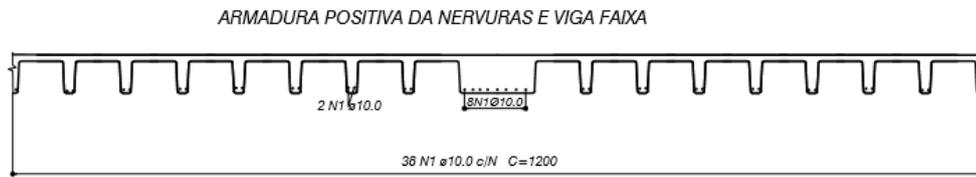
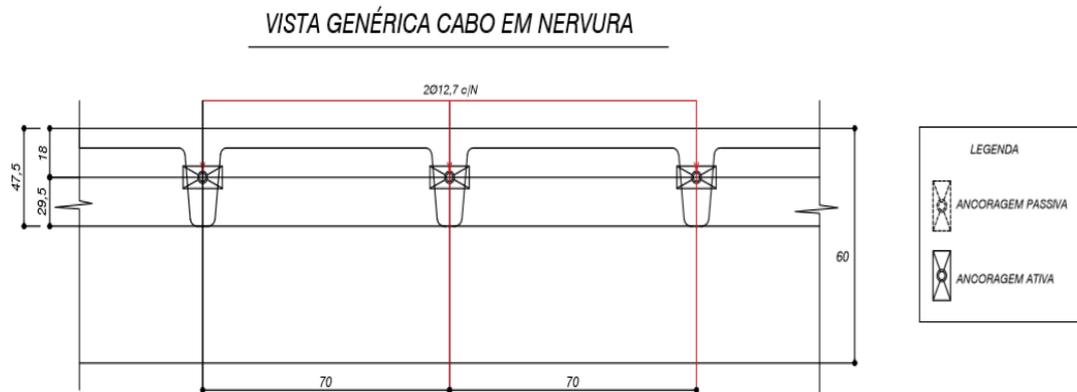


Figura XXIII – Armadura Positiva de Nervuras



3.1.1 Detalhe dos cabos

Figura XXIV – Vista genérica cabo em nervura



3.1.1.1 Armação negativa

Figura XXV – Armadura Negativa

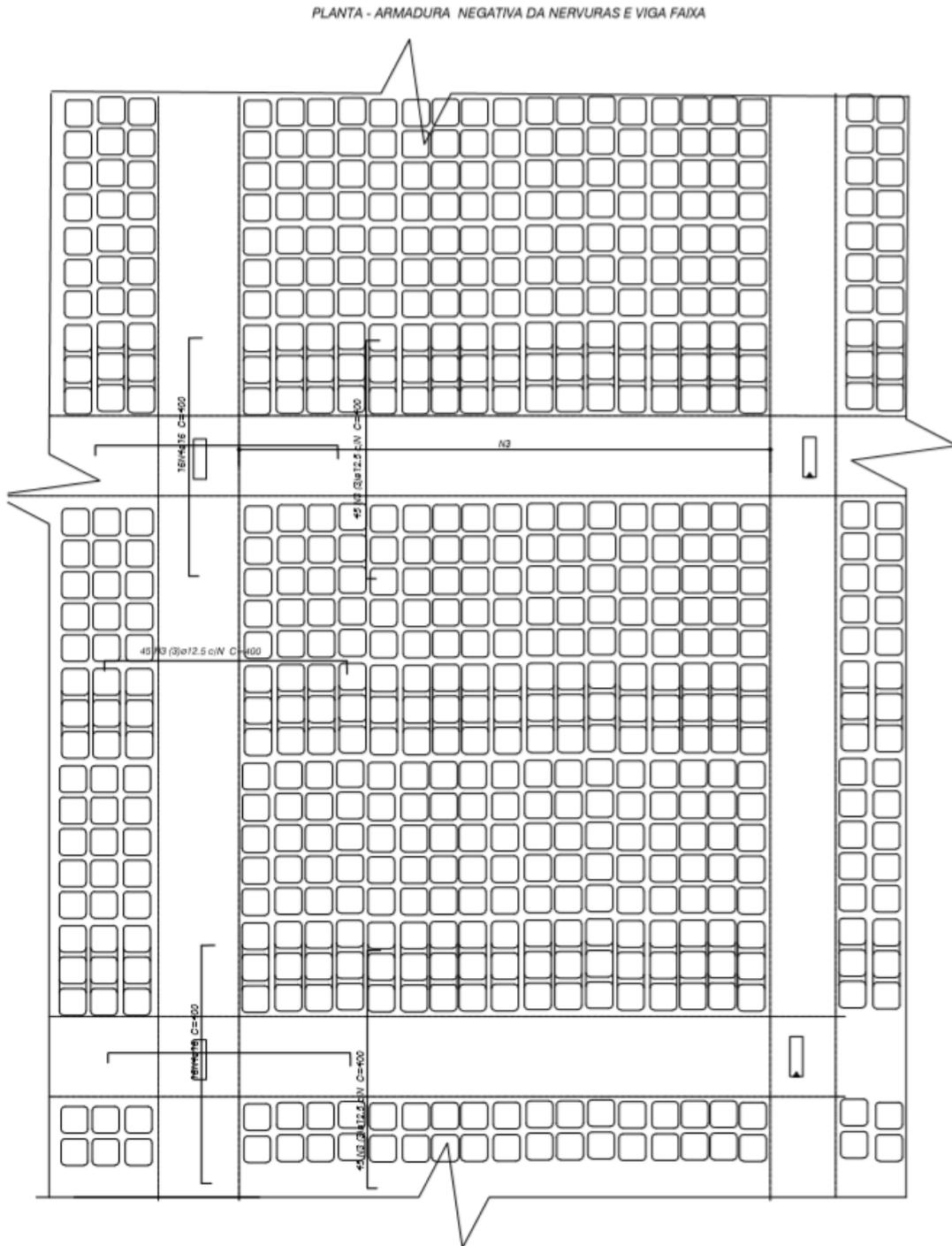
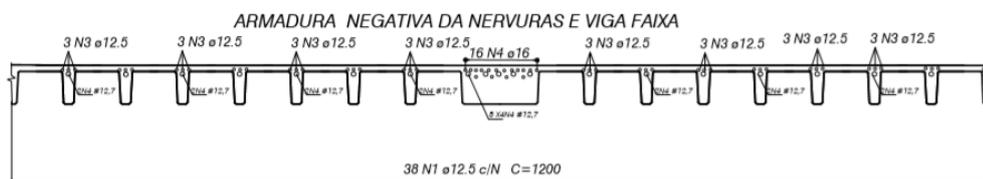


Figura XXVI – Armadura Negativa



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dessa forma, restou demonstrado as representações das protensões mais utilizadas no projeto de estruturas protendidas em lajes nervuradas, bem como, ilustrar exemplos de representação através de cargas equivalentes de protensão. Assim, foi evidenciado que as barras de aço são capazes de comprimir o concreto, fazendo com que ele trabalhe predominantemente comprimido, obtendo-se deste modo, um ganho considerável de resistência e aproveitamento dos materiais da construção civil.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118/2003**. Projeto de estrutura de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. Design and construction of reinforced concrete ribbet slabs. 2005, 245 fls. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) – Universidade Federal de São Carlos, 2005.

MENEGATTI, marcelo a protensão como um conjunto de cargas concentradas equivalentes. 2004. 126 p. dissertação (mestrado) - escola politécnica da universidade de são paulo. departamento de engenharia de estruturas e fundações.

BRASIL, Atex Brasil catálogo técnico. Disponível em: < <https://solucoes.atex.com.br/catalogo/> >. Acesso em: 13 set. 2018.

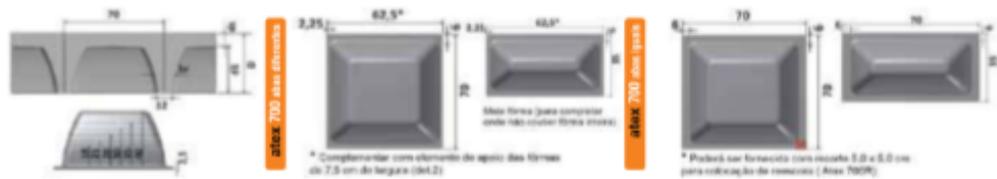
SALVADOR, Sebastião. Apostila do curso sobre a utilização de cordoalhas plastificadas engraxadas em laje protendidas. Escola de engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de estruturas, 2004.

CHOLFE, Luiz. Concreto protendido: teoria e prática / Luiz Cholfe & Luciana Bonilha. 2. ed., São Paulo: oficina de textos, 2018.

ANEXO

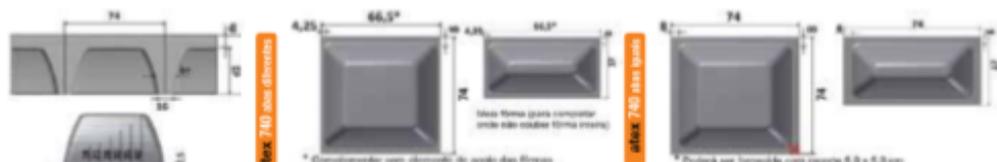
Atex 700

ALTEZA DA TELA (cm)	DIMENSÃO DA LAMINA		LARGURA DA REDEMO			ÁREA DA TELA (cm²)	ESPESOR DO CILINDRO		PESO		VOLUME (litros)		PESO (kg/m²)	VOLUME DE CONCRETO (m³/m²)
	cm	cm	cm	cm	cm		cm	cm	cm	cm	m²	m³/m²		
18,0	5,0	23,0	12,0	14,2	13,1	585	7,0	16,8	24995	16,2	0,058	0,119	2,78	0,111
	7,5	25,5				761	7,6	17,9	34229	18,0			3,40	0,136
	10,0	28,0				836	8,5	19,5	45523	19,8			4,63	0,161
21,0	5,0	26,0	12,0	15,0	13,5	524	8,1	17,9	26015	18,2	0,067	0,137	3,08	0,123
	7,5	28,5				809	8,6	19,9	48296	20,2			3,79	0,148
	10,0	31,0				884	9,4	21,8	62295	22,0			4,33	0,173
26,0	5,0	31,0	12,0	16,4	14,2	719	10,1	20,9	60899	21,9	0,081	0,165	3,63	0,145
	7,5	33,5				894	10,4	23,1	79131	23,8			4,25	0,179
	10,0	36,0				1060	11,0	25,0	99047	25,7			4,88	0,195
30,0	5,0	35,0	12,0	18,0	15,0	800	11,8	23,2	87628	24,7	0,091	0,185	4,13	0,165
	7,5	37,5				975	11,9	25,6	112103	26,6			4,75	0,190
	10,0	40,0				1150	12,4	27,8	138816	28,7			5,38	0,215
35,0	5,0	40,0	12,0	20,0	16,0	910	13,9	26,1	138753	28,2	0,102	0,208	4,80	0,192
	7,5	42,5				1085	14,0	28,5	164577	30,4			5,43	0,217
	10,0	45,0				1260	14,4	30,7	199554	32,5			6,05	0,242
40,0	5,0	45,0	12,0	22,2	17,1	1034	16,1	28,9	189636	31,7	0,112	0,228	5,55	0,222
	7,5	47,5				1209	16,1	31,4	231618	34,1			6,18	0,247
	10,0	50,0				1384	16,4	33,8	277525	36,1			6,80	0,272
d1	ds	D	bl	bs	br	A	rs	rl	I	hq	V/V	CONCRETO 25kN/m³		

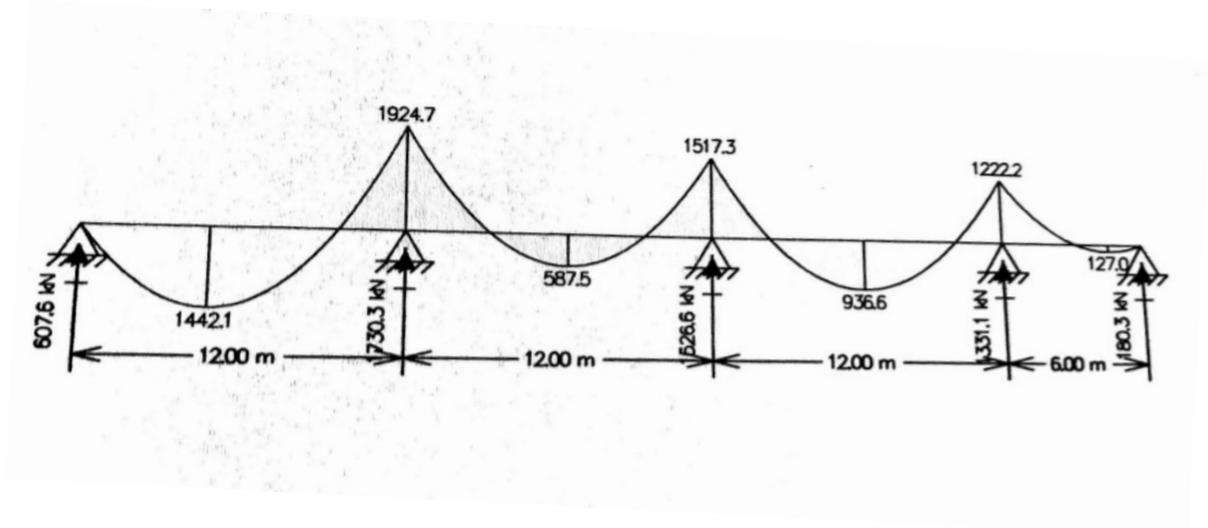


Atex 740

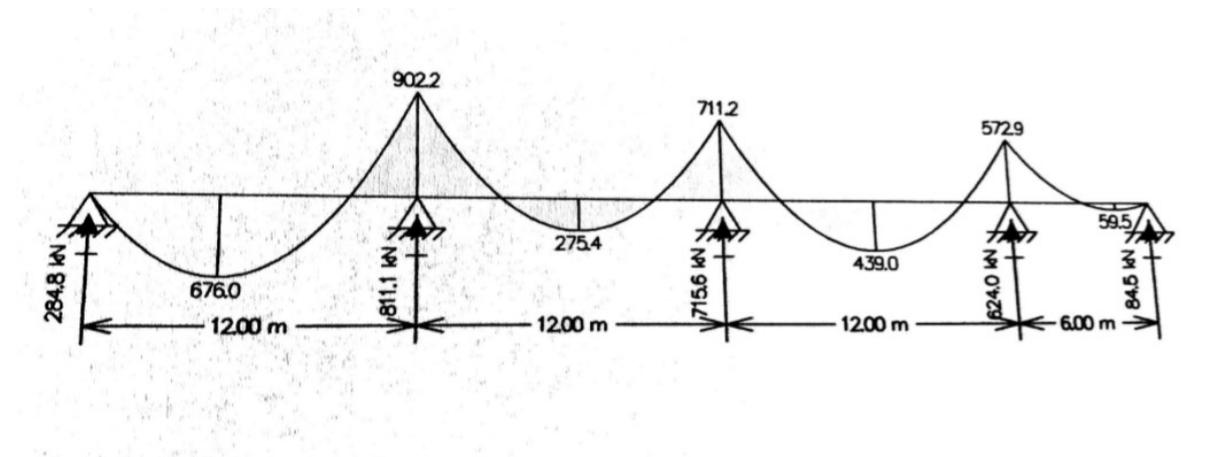
ALTEZA DA TELA (cm)	DIMENSÃO DA LAMINA		LARGURA DA REDEMO			ÁREA DA TELA (cm²)	ESPESOR DO CILINDRO		PESO		VOLUME (litros)		PESO (kg/m²)	VOLUME DE CONCRETO (m³/m²)
	cm	cm	cm	cm	cm		cm	cm	cm	cm	m²	m³/m²		
18,0	5,0	23,0	16,0	18,4	17,2	680	7,6	16,4	30604	17,1	0,058	0,106	3,10	0,124
	7,5	25,5				865	8,2	17,3	42202	19,0			3,73	0,149
	10,0	28,0				1050	9,1	18,9	56925	20,9			4,35	0,174
21,0	5,0	26,0	16,0	19,8	17,4	725	8,8	17,2	43808	19,2	0,067	0,133	3,43	0,137
	7,5	28,5				920	9,3	19,2	58992	21,2			4,05	0,162
	10,0	31,0				1105	10,0	21,0	78219	23,1			4,68	0,187
26,0	5,0	31,0	16,0	20,4	18,2	843	10,9	20,1	73869	22,9	0,081	0,148	4,05	0,162
	7,5	33,5				1028	11,2	22,3	98379	25,0			4,68	0,187
	10,0	36,0				1213	11,8	24,2	129847	27,0			5,30	0,212
30,0	5,0	35,0	16,0	22,0	19,8	940	12,6	22,4	105817	25,8	0,091	0,186	4,60	0,184
	7,5	37,5				1125	12,9	24,7	135786	28,0			5,23	0,209
	10,0	40,0				1310	13,4	26,6	167388	30,0			5,85	0,234
35,0	5,0	40,0	16,0	24,0	20,8	1070	14,8	25,2	157132	29,4	0,103	0,187	5,35	0,214
	7,5	42,5				1255	15,0	27,6	197966	31,8			5,98	0,239
	10,0	45,0				1440	15,4	29,8	240386	33,9			6,60	0,264
40,0	5,0	45,0	16,0	26,2	21,1	1214	17,0	28,9	223352	33,1	0,112	0,204	6,15	0,246
	7,5	47,5				1399	17,1	30,4	277947	35,5			6,78	0,271
	10,0	50,0				1584	17,5	32,5	332198	37,8			7,40	0,296
d1	ds	D	bl	bs	br	A	rs	rl	I	hq	V/V	CONCRETO 25kN/m³		



Carga Permanente



Carga Acidental



CARREGAMENTO EQUIVALENTE

