

Autores:

Giovani Lima de Souza – Bacharel Em Física/UFRGS  
Auditor-Fiscal do Trabalho – MTE/SRTE-RS/SEGUR

Miguel Coifman Branchtein – Eng. Civil/UFRGS  
Auditor-Fiscal do Trabalho – MTE/SRTE-RS/SEGUR

Contato:

Giovani Lima de Souza Fone: 0xx55-34122601  
email: [giovani.souza@mte.gov.br](mailto:giovani.souza@mte.gov.br)

Miguel Coifman Branchtein  
email: [miguel.branchtein@mte.gov.br](mailto:miguel.branchtein@mte.gov.br)

# Dimensionamento de sistema de cabo de aço sujeito a uma ação transversal

## RESUMO

É crescente o uso de sistemas compostos por cabos de aço como proteção contra quedas de altura em obras de construção civil, seja ela proteção individual, como o cabo-guia horizontal para fixação do cinto de segurança, ou coletiva, como no caso do sistema constituído por cabos de aço horizontais unidos por rede, também chamado de guarda-corpo flexível. Nesses sistemas, a força é aplicada transversalmente ao cabo de aço. De modo geral, um cabo flexível suporta apenas os esforços de tração, ou seja, paralelos ao seu próprio eixo. Por isso, a ação aplicada transversalmente ao eixo do cabo deve ser equilibrada somente pelos esforços que atuam paralelamente a ele. Sob a ação da força transversal, o cabo se flexiona, seja por possuir uma folga de comprimento, seja devido a sua elasticidade, formando um ângulo determinado. Quanto menor o ângulo formado pelo cabo, maior será a força em resposta à ação aplicada, sendo possível que essa força chegue a um valor muito superior à ação transversal. A força de tração que surge no cabo é calculada levando-se em conta se o cabo tem uma folga inicial, se está estendido ou se está pré-tensionado. São considerados o caso em que a força aplicada transversalmente é concentrada apenas em um ponto e o caso em que a força é distribuída ao longo do cabo. Além do dimensionamento do cabo de aço em cada caso, também são apresentados conceitos gerais sobre cabos de aço e sistemas de proteção contra quedas de altura.

Palavras-chave: Cabos de aço. Proteção contra quedas. Dimensionamento.

# Sumário

I	Introdução .....	4
1	Cabos de aço .....	5
	a Caracterização dos cabos de aço .....	5
	b Propriedades e parâmetros de um cabo de aço .....	6
	c Deformações longitudinais de um cabo de aço .....	7
2	Sistemas de proteção contra quedas.....	8
	a Sistemas de Impedimento de Queda ( <i>Fall Restraint System</i> ).....	8
	b Sistemas de Captura de Queda ( <i>Fall Arresting System</i> ). .....	8
II	Dimensionamento .....	9
1	Cabo inelástico.....	10
	a Carga concentrada P aplicada no centro do vão: .....	10
	b Carga distribuída uniforme ao longo do vão .....	13
2	Cabo elástico.....	18
	a Carga concentrada P aplicada no centro do vão: .....	18
	b Carga distribuída uniforme ao longo do vão .....	21
III	Considerações e conclusões.....	24
	a Exemplos de dimensionamento .....	24
	i Linha de vida .....	24
	ii Guarda-corpo .....	25
	b Conclusões .....	27
IV	Referências .....	28
V	Anexos .....	29
1	Características dos cabos de aço da classe 6 x 19.....	29

## **I Introdução**

O uso de cabos de aço em sistemas de proteção de trabalhadores contra quedas de altura é, atualmente, bastante difundido. Por suas características, a construção civil é uma área em que tais sistemas são amplamente utilizados. O tema é especialmente relevante dada a altíssima frequência dos acidentes fatais envolvendo quedas de altura. Como exemplo, estudo recente sobre acidentes de trabalho fatais ocorridos entre 2001 e 2007 no Rio Grande do Sul<sup>5</sup> revelou a causa mais frequente de óbitos como sendo causada por quedas, correspondendo a 31,8% do total de todos acidentes fatais. Dentro do grupo quedas, os dois maiores subgrupos identificados foram; quedas durante a realização de serviços em telhados, com 22,5% e, queda em/ou de andaimes, com 16,9%. Cabe ressaltar que os acidentes fatais representam uma fração menor do total de acidentes, dando o estudo um indicativo que o prejuízo familiar, social e econômico pode ampliar-se consideravelmente com a inclusão das conseqüências dos acidentes não-fatais. Assim, por tratar da vida e integridade física de trabalhadores, tendo ainda, fortes repercussões econômicas, diversos países, incluindo o Brasil, contemplam essa realidade provendo textos regulamentadores<sup>3, 4</sup> sobre o tema. No entanto, esses textos, de modo geral, estipulam regras de caráter abrangente, sempre pressupondo que o projeto desses sistemas de segurança seja feito por pessoal técnico especializado. Dessa forma, um bom projeto deve, não só seguir o regramento legal consoante como também considerar o que é específico para cada realidade local, assegurando a perfeita construção e uso das estruturas e equipamentos. Nesse contexto, é imprescindível um correto dimensionamento do projeto que, fazendo uso do conhecimento teórico e prático, explicita os cálculos e os valores de todas as grandezas pertinentes. Assim, o presente trabalho tem o propósito de aumentar o conhecimento nesta área, apresentando conceitos gerais sobre cabos de aço, sistemas de proteção

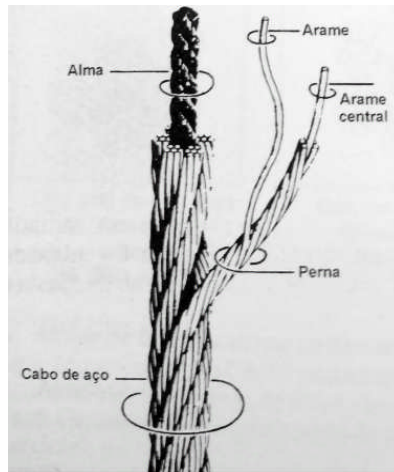
contra quedas de altura e os cálculos envolvidos no dimensionamento de sistemas de cabo de aço sujeitos a uma ação transversal.

## **1 Cabos de aço**

Os cabos de aço são dispositivos mecânicos utilizados para muitas finalidades. Sua propriedade característica é de possuir rigidez somente ao longo de seu comprimento, fazendo com que as forças nele aplicadas também estejam nesta mesma direção, a direção longitudinal do cabo.

### **a Caracterização dos cabos de aço**

Os elementos componentes básicos de cabo de aço (Figura 1) são as suas pernas e a sua alma(ou núcleo). As pernas são constituídas por um conjunto de arames torcidos em forma de hélice, que por sua vez , são também torcidas helicoidalmente em torno do núcleo do cabo. A perna de um cabo também pode possuir um núcleo ou ser torcida em torno de um arame central. A função principal da alma de um de um cabo de aço é de servir de suporte para as pernas, posicionando-as de modo que elas recebam e dividam uniformemente as cargas aplicadas ao cabo. As almas dos cabos de aço podem ser constituídas por fibras naturais ou artificiais, por uma perna ou mesmo um cabo de aço independente. Segundo a Norma Brasileira<sup>1</sup>, construção é o termo genérico usado para caracterizar um cabo de aço, especificando o número de pernas, o número de arames de cada perna, a sua disposição e o tipo de alma.



*Figura 1: Componentes típicos de um cabo de aço<sup>2</sup>*

Outra definição encontrada na Norma é a classe do cabo, a qual agrupa cabos com construções de características semelhantes. Como exemplo de classes, temos:

<b>Classe</b>	<b>Descrição</b>
6 x 7	Até 7 arames externos em uma perna, uma camada de arame sobre o arame central
18 x 7	18 pernas no cabo. Duas camadas de perna sobre alma de fibra ou aço

*Tabela 1 – Exemplos de classe de cabos de aço<sup>1</sup>*

### **b Propriedades e parâmetros de um cabo de aço**

Um dos parâmetros mais importantes de um cabo de aço é a sua carga de trabalho, a qual representa a força de tração máxima que pode ser a que o cabo pode ser submetido com segurança. Esta carga não deve exceder, via de regra, a um quinto de sua carga mínima de ruptura. O fator, ou índice, de segurança de um cabo é dado pela razão

entre a sua carga de ruptura mínima e sua carga de trabalho. A carga de ruptura de um cabo está relacionada com a resistência do seus arames multiplicada pela soma da área metálica de todos os arames. Os fatores de segurança de para cabos de aço variam, tipicamente, de 3 a 12, dependendo do tipo de aplicação. No Brasil, a norma regulamentadora n. 18, a qual trata sobre a condições do meio ambiente de trabalho na indústria da construção, estabelece um fator de segurança mínimo<sup>4</sup> de 5.

### **c Deformações longitudinais de um cabo de aço**

Existem, basicamente, dois tipos de deformações longitudinais em um cabo de aço: as deformações estruturais e as deformações elásticas. A deformação estrutural decorre dos ajustes dos arames das pernas em relação à alma do mesmo e é maior nos primeiros dias ou semanas de operação de um cabo de aço. O processo de pré-esticamento dos cabos pode remover quase completamente as deformações estruturais, permitindo que o cabo possa atender, desde o início, os requisitos para os quais foi projetado.

A deformação elástica de um cabo está relacionada com a elasticidade do aço usado e das características de sua construção. Ela é diretamente proporcional à carga aplicada e ao comprimento do cabo de aço, e inversamente proporcional ao seu módulo de elasticidade e área metálica:

$$\Delta L = PL/EA$$

sendo:

$\Delta L$ : deformação elástica,

P: carga aplicada,

L: comprimento do cabo,  
E: módulo de elasticidade,  
A: área metálica do cabo.

## **2 Sistemas de proteção contra quedas**

De modo geral, os sistemas de proteção de queda de altura podem ser divididos em dois grupos<sup>6</sup>:

### **a Sistemas de Impedimento de Queda (*Fall Restraint System*)**

Caracterizam-se por impedir que as quedas aconteçam. Subdividem-se em dois grupos: passivos e ativos. Os sistemas passivos mantêm o trabalhador em uma zona segura sem que ele precise executar qualquer ação especial. Como exemplo, podemos citar os sistemas com guarda-corpo e rodapé e as jaulas usadas em escadas. Os sistemas ativos requerem que o trabalhador monte ou ative o sistema de segurança. Como exemplo, temos os sistemas que requerem que o trabalhador conecte o seu cinto de segurança em algum local ou dispositivo de modo a evitar a sua queda.

### **b Sistemas de Captura de Queda (*Fall Arresting System*).**

Eles são projetados para agir no momento em que o trabalhador está caindo, impedindo-o de atingir os lugares abaixo nos quais poderia sofrer danos. Comparativamente, tais sistemas são mais complexos que aqueles que previnem quedas; exigem maior treinamento por parte dos trabalhadores e dispositivos de segurança mais



elaborados. E, dada a forte possibilidade de que o trabalhador que sofreu uma queda acabe em lugar de difícil acesso, tais sistemas devem contemplar planos de resgate previamente estabelecidos. Um requisito fundamental em tais sistemas é a sua capacidade de dissipar a energia cinética adquirida pelo trabalhador durante a queda. Essa energia pode resultar em forças atuantes sobre o corpo do trabalhador maiores do que 2000 kgf para tão somente 60 centímetros de queda livre. Exemplos de tais sistemas incluem as redes de segurança e os que usam cabos verticais em andaimes suspensos e escadas.

## II Dimensionamento

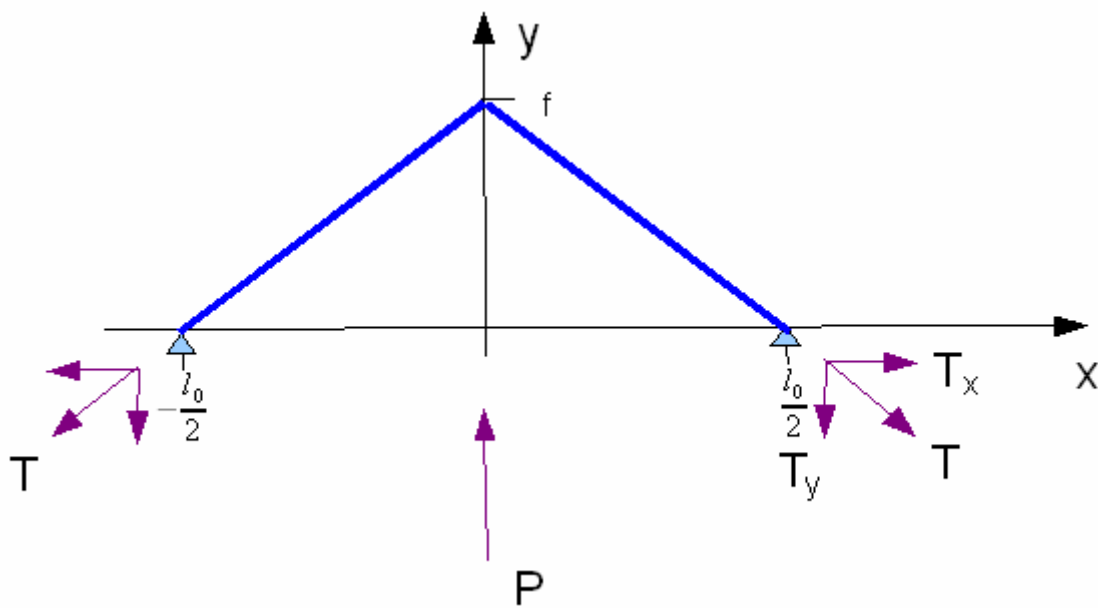
Será considerado um cabo de aço fixo em dois pontos, com uma distância  $l_0$  entre si. A reta que passa pelos pontos de apoio define um eixo que será denominado  $x$ . As forças aplicadas sobre o cabo tem uma única direção, ortogonal a  $x$ , e que define um eixo que será chamado de  $y$ . A direção  $y$  pode ser horizontal, por exemplo uma força horizontal de impacto sobre o cabo do guarda-corpo, ou vertical, por exemplo um impacto de cima para baixo exercido sobre a linha de vida pelo talabarte do cinto, ou ainda intermediária, mas sempre ortogonal à direção do eixo  $x$ . Serão considerados os casos de uma força concentrada  $P$  e de uma carga distribuída  $q$ . O cabo de aço será considerado como um fio flexível ideal, isto é, sem rigidez à flexão. O único esforço transmitido é o de tração. Logo, a força interna no cabo é puramente axial, ou seja, tem a direção da tangente ao cabo. O peso próprio do cabo será desprezado frente à força aplicada. Esta suposição terá de ser verificada no final. Inicialmente o cabo será considerado inelástico e posteriormente com elasticidade. Neste caso, o comprimento

inicial  $l_1$  do cabo poderá ser maior, igual ou mesmo um pouco menor do que o comprimento do vão  $l_0$ , quando então o cabo já terá uma tensão inicial  $T_1$ , antes de aplicada a força transversal. Porém, o comprimento  $l_1$  não pode ser muito menor que  $l_0$ , para que o fator de segurança não seja ultrapassado.

## 1 Cabo inelástico

### a Carga concentrada $P$ aplicada no centro do vão:

Seja uma carga concentrada  $P$  aplicada no centro de vão na direção de  $y$ , sentido positivo.



$P$  = Força aplicada

$T$  = Força de tração no cabo

$T_x, T_y$  = Projeções de  $T$  nos eixos  $x$  e  $y$

$l_0$  = comprimento do vão

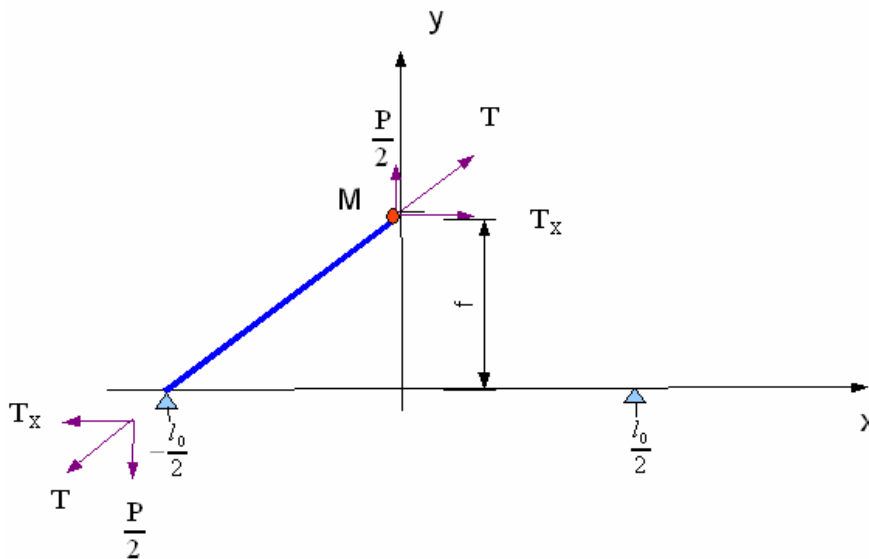
$l$  = comprimento do cabo

$f$  = comprimento da flecha

$$\left(\frac{l_0}{2}\right)^2 + f^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 \quad (1)$$

Pelas equações de equilíbrio:  $T_y = P/2$  (2)

Seccionando o cabo imediatamente à esquerda do eixo y e substituindo a parte da direita pela força de tração que ela exerce sobre a parte da esquerda, esta permanece em equilíbrio:



Pela equação do equilíbrio dos momentos em relação ao ponto M:

$$\frac{P}{2} \cdot \frac{l_0}{2} - T_x \cdot f = 0$$

$$T_x = \frac{P \cdot l_0}{4f} \quad (3)$$

O valor do módulo da força de tração é obtido combinando as

componentes em x e y (eqs. 2 e 3):

$$T = \sqrt{\left(\frac{P}{2}\right)^2 + \left(\frac{P \cdot l_0}{4f}\right)^2} = \frac{P}{2f} \sqrt{f^2 + \left(\frac{l_0}{2}\right)^2}, \text{ e usando a relação geométrica}$$

(1), temos:

$$T = \frac{P \cdot l}{4f} \quad (4)$$

Esta força de tração é constante ao longo de todo o cabo, e é o valor usado para dimensionar o cabo e também para dimensionar os pontos de fixação do cabo.

$f/l_0$	$l/l_0-1$	T/P
1%	0,02%	25,00
2%	0,08%	12,51
3%	0,18%	8,35
4%	0,32%	6,27
5%	0,50%	5,02
10%	1,98%	2,55
15%	4,40%	1,74
20%	7,70%	1,35
25%	11,80%	1,12

*Tabela 2*

A 1ª coluna da Tabela 2 mostra a razão entre a flecha e o vão ( $f/l_0$ ); a 2ª coluna mostra o comprimento do cabo em relação ao comprimento do vão ( $(l-l_0)/l_0$ ) e é calculada a partir da 1ª coluna usando-se a equação (1); a 3ª traz a razão entre a força de tração no cabo e a força aplicada (T/P). A Tabela 2 exemplifica como a força de tração cresce quando a razão entre a flecha e o vão ( $f/l_0$ ) diminui.

A equação (3) dá margem a algumas considerações:

i. A tensão no cabo é inversamente proporcional à flecha. Assim, quando a flecha tende a zero, a tensão tende ao infinito.

ii. Podemos reescrevê-la como:

$$T_X \cdot f = \frac{P \cdot l_0}{4},$$

reconhecendo no membro direito a expressão para o momento fletor de uma viga simplesmente apoiada submetida a uma carga P no centro do vão. Assim, tanto a viga apoiada como o cabo suspenso conseguem equilibrar o mesmo momento gerado pelas forças externas, cada um à sua maneira. A viga consegue transmitir vários tipos de esforços internos (normal, cortante, flexão, torção) e assim dá conta da tarefa com deformações muito pequenas, menores do que 1% do vão. Já o cabo só transmite o esforço normal de tração. Por isso, para equilibrar o momento das forças externas, tem que mudar sua geometria juntamente com a tensão. E se a variação na geometria for limitada, devido a pouca folga no comprimento, a tensão aumenta mais.

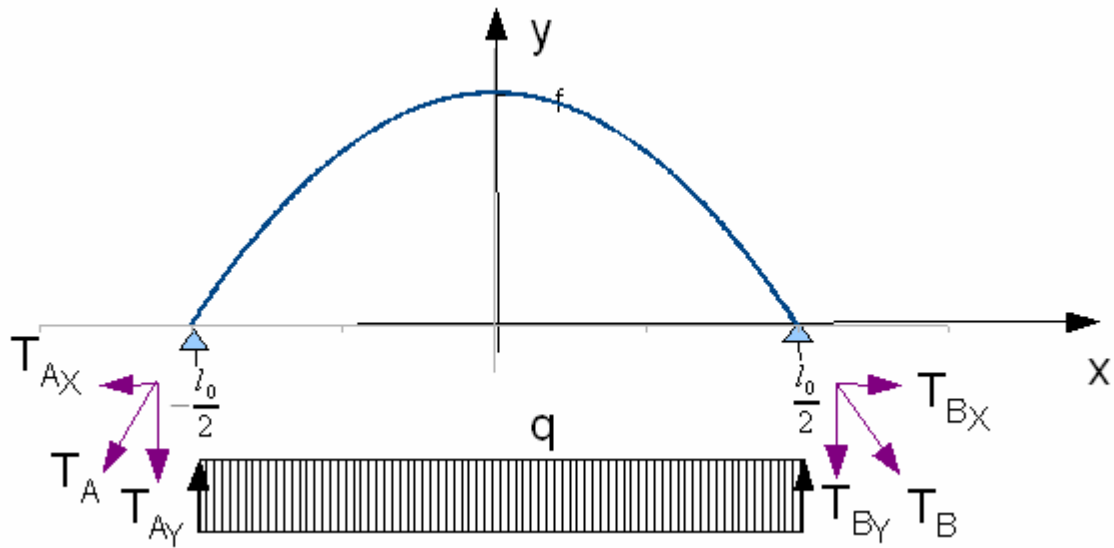
iii. A função  $y(x)$ , que dá as coordenadas da curva formada pelo cabo, tem a mesma forma da função momento fletor  $M(x)$  de uma viga apoiada com o mesmo carregamento. Isso se dá porque em cada seção do cabo deve haver equilíbrio do momento devido às forças externas:

$M(x) - T_X \cdot y(x) = 0$ . E  $T_X$  é constante, já que não há forças aplicadas na direção x.

### **b Carga distribuída uniforme ao longo do vão**

Agora, seja o cabo de aço fixo em dois pontos, submetido a uma carga  $q$  distribuída uniformemente, com direção e sentido do eixo y, perpendicular ao eixo x

que passa pelos pontos de fixação.



$q$  = Carga distribuída aplicada

$T_A, T_B$  = Força de tração no cabo nas extremidades A e B

$T_x, T_y$  = Projeções de  $T$  nos eixos  $x$  e  $y$

$l_0$  = comprimento do vão

$l$  = comprimento do cabo

$f$  = comprimento da flecha

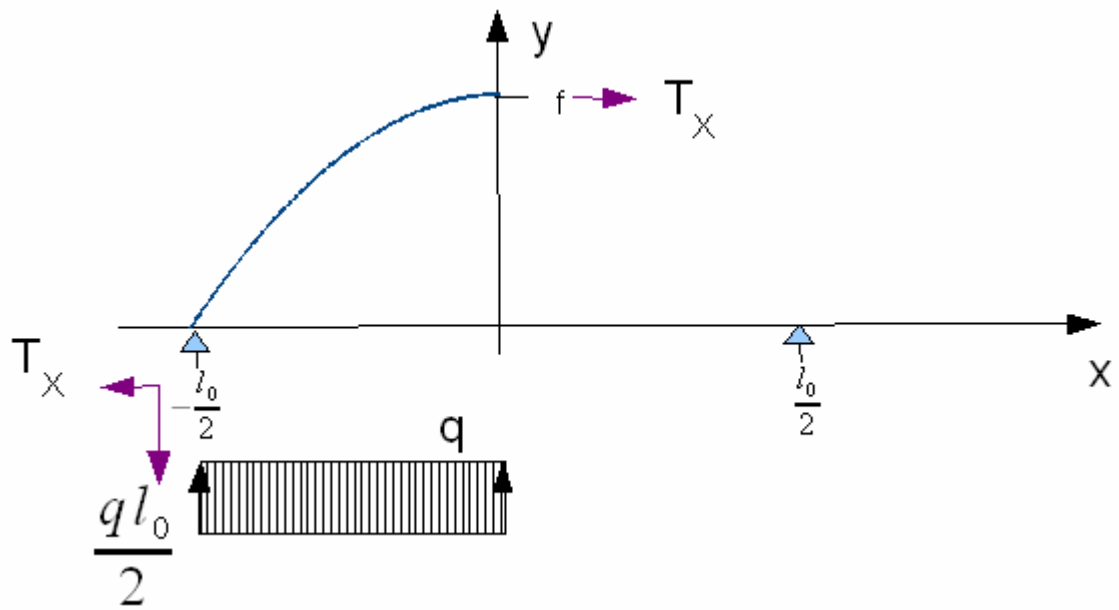
Pela equação de equilíbrio das forças em X, a componente em X da tração é constante ao longo de todo o cabo, igual a  $T_x$ , pois não há forças aplicadas na direção X. Assim,

$$T_{Ax} = T_{Bx} = T_x \quad (5)$$

Pelo equilíbrio das forças em Y e dos momentos,

$$T_{Ay} = T_{By} = ql_0/2 \quad (6)$$

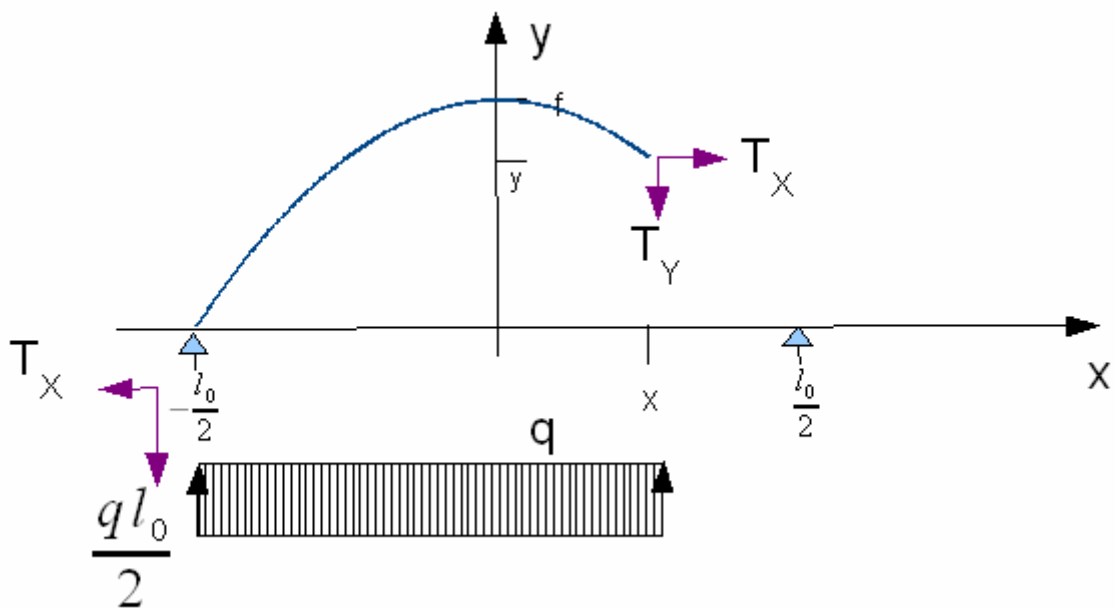
Seccionando o cabo no eixo  $y$  e substituindo a parte da direita pela força de tração que ela exerce sobre a parte da esquerda, esta permanece em equilíbrio:



Pelo equilíbrio do momento das forças em relação ao ponto (0,f):

$$T_X \cdot f = \frac{q \cdot l_0^2}{8} \quad (7).$$

Seccionando o cabo em um ponto (x, y) qualquer e substituindo a parte da direita pela força de tração que ela exerce sobre a parte da esquerda, esta permanece em equilíbrio:



Como já mencionado acima, já que não há forças aplicadas em X, a componente em X da força de tração,  $T_X$ , é constante.

Já pela equação de equilíbrio em Y,

$$T_Y(x) = qx \quad (8).$$

E pela equação do equilíbrio dos momentos em relação ao ponto (x, y):

$$T_X \cdot y = \frac{q}{2} \left[ \left( \frac{l_0}{2} \right)^2 - x^2 \right], \text{ e, substituindo } T_X \text{ por (7), obtemos a equação da}$$

curva assumida pelo cabo de aço submetido a uma carga uniforme, que é uma parábola:

$$y(x) = f \left[ 1 - \left( \frac{2x}{l_0} \right)^2 \right] \quad (9)$$

O comprimento  $l$  do cabo é dado pelo comprimento do arco de uma parábola com corda  $l_0$  e flecha  $f$ :

$$l = l_0 \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{4f}{l_0} \right)^2} + \frac{l_0}{4f} \ln \left( \frac{4f}{l_0} + \sqrt{1 + \left( \frac{4f}{l_0} \right)^2} \right) \right] \quad (10)$$

Combinando  $T_X$  e  $T_Y$  (eqs. 7 e 8):

$$T = \frac{ql_0^2}{8f} \sqrt{1 + \left( \frac{8fx}{l_0^2} \right)^2} \quad (11)$$



O valor da tração nos pontos de apoio é:

$$T(l_0/2) = \frac{ql_0^2}{8f} \sqrt{1 + \left(\frac{4f}{l_0}\right)^2} \quad (12)$$

Esse é o valor máximo da força de tração, usado para dimensionar o cabo de aço e os apoios.

f/l <sub>0</sub>	l/l <sub>0</sub> -1	T/ql <sub>0</sub>
1%	0,03%	12,51
2%	0,11%	6,27
3%	0,24%	4,20
4%	0,43%	3,16
5%	0,66%	2,55
10%	2,61%	1,35
15%	5,71%	0,97
20%	9,82%	0,80
25%	14,78%	0,71

*Tabela 3*

Na Tabela 3, que é semelhante à Tabela 2; os valores da 2ª coluna são obtidos da 1ª coluna usando-se a equação (10); a 3ª traz a razão entre a força de tração máxima no cabo e a força aplicada (T/ql<sub>0</sub>), calculada pela eq. (12). Novamente, como no caso da força pontual, vemos que a força de tração cresce quando a razão entre a flecha e o vão diminui, podendo ficar muito maior que a força aplicada.

Para mesmos valores de flechas pequenas, observamos que os valores de T/ql<sub>0</sub> da força distribuída são aproximadamente a metade do valor T/P para o caso da força pontual. Isto se deve a predominância da componente T<sub>X</sub> quando a flecha é pequena, sendo T<sub>X</sub> = Pl<sub>0</sub>/4f no caso da força pontual e metade desse valor no caso da força distribuída (considerando a substituição de P por ql<sub>0</sub>).

As mesmas considerações do caso anterior podem ser aplicadas nesse

caso, pois:

- i. O lado direito da expressão (7) é reconhecido como o momento fletor máximo de uma viga apoiada submetida a um carregamento uniforme.
- ii. A forma parabólica que o cabo assume reproduz a forma da função momento fletor de uma viga submetida ao mesmo carregamento.

## 2 Cabo elástico

### a Carga concentrada P aplicada no centro do vão:

A deformação elástica do cabo é diretamente proporcional à carga aplicada e ao comprimento do cabo de aço, e inversamente proporcional ao seu módulo de elasticidade e à área metálica<sup>2</sup>.

$$l - l_1 = \frac{Tl_1}{EA_m} \quad (13),$$

onde

T= força de tração no cabo,

$l_1$  = comprimento inicial do cabo,

$l$  = comprimento do cabo com tensão,

E = módulo de elasticidade do cabo,

$A_m$  = Área metálica do cabo.

Como o carregamento aplicado é igual, a aplicação das equações de equilíbrio repete os passos do caso inelástico. Assim, no estado de equilíbrio, tensão no

cabo é dada pela mesma equação (4):

$$T = \frac{P \cdot l}{4f}.$$

E a relação entre o comprimento do cabo e a flecha obviamente continua dada pela eq. (1):

$$\left(\frac{l_0}{2}\right)^2 + f^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2$$

A partir dessas 3 equações, pode-se encontrar os valores da tração no cabo T, do comprimento do cabo no equilíbrio l e da flecha no equilíbrio f.

O problema pode ser simplificado, considerando que a tensão de ruptura de um cabo é proporcional a sua área metálica. Na Tabela do anexo I, verifica-se que, para todas as bitolas de um cabo da classe 6x19 com alma de aço de cabo independente, formado por arames da faixa de resistência à tração EIPS, a razão entre a carga de ruptura e a área metálica varia muito pouco com a diâmetro do cabo, sendo em média 152,9 kgf/mm<sup>2</sup>. Adotando um fator de segurança n=5, isto é, escolhendo um cabo com carga de ruptura igual a 5 vezes a força de tração T, a área metálica é

$$A_m = 5 T / 152,9 = T/30,58.$$

Por outro lado, o módulo de elasticidade E de um cabo de classe 6x19 usado ou pré-esticado é em média 12600 kgf/mm<sup>2</sup>.

$$\text{Assim, a eq. 13 se reduz a: } l = 1,0024l_1.$$

De uma maneira geral, podemos escrever

$$l = (1 + \varepsilon)l_1 \quad (14)$$

Sendo que  $\varepsilon = \frac{T_R}{nEA_m}$ , onde

$\varepsilon$  = alongamento,

$T_R$  = Carga de ruptura do cabo,

$A_m$  = área metálica do cabo,

$E$  = módulo de elasticidade,

$n$  = fator de segurança.

Substituindo a eq. 14 na 1:

$$\frac{f}{l_0} = \frac{1}{2} \sqrt{(1+\varepsilon)^2 \left(\frac{l_1}{l_0}\right)^2 - 1} \quad (15)$$

E substituindo na (4):

$$\frac{T}{P} = \frac{1}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{1}{1+\varepsilon}\right)^2 \left(\frac{l_0}{l_1}\right)^2}} \quad (16)$$

Essas expressões mostram que não há solução com o fator de segurança desejado se  $l_1 < l_0 / (1 + \varepsilon)$ .

Além disso, se  $l_1$  tende a  $l_0 / (1 + \varepsilon)$ ,  $f$  tende a 0 e  $T$  tende ao infinito.

Por outro lado, se o módulo de elasticidade  $E$  tende a infinito,  $\varepsilon$  tende a 0,  $l$  tende a  $l_1$ , e recuperam-se as fórmulas do caso inelástico.

Na Tabela seguinte mostra-se os valores de flecha, comprimento e tensão

para o caso elástico, a partir dos valores da flecha e comprimento iniciais e da tensão calculada sem considerar a elasticidade do cabo.

sem elasticidade			com elasticidade			variação percentual	
$f_1/l_0$	$l_1/l_0-1$	$T_1/P$	$f/l_0$	$l/l_0-1$	$T/P$	$\Delta f/f_1$	$\Delta T/T_1$
	-0,2421%		0,00%	0,00%			
	-0,2220%		1,00%	0,02%	24,9		
	-0,1620%		2,00%	0,08%	12,48		
	-0,0630%		3,00%	0,18%	8,36		
0%	0,00%		3,49%	0,24%	7,19		
1%	0,02%	25,00	3,63%	0,26%	6,91	262,69%	-72,36%
2%	0,08%	12,51	4,02%	0,32%	6,24	101,05%	-50,14%
3%	0,18%	8,35	4,60%	0,42%	5,45	53,45%	-34,68%
4%	0,32%	6,27	5,31%	0,56%	4,73	32,82%	-24,53%
5%	0,50%	5,02	6,11%	0,74%	4,13	22,10%	-17,90%
10%	1,98%	2,55	10,61%	2,23%	2,41	6,13%	-5,55%
15%	4,40%	1,74	15,44%	4,66%	1,7	2,90%	-2,58%
20%	7,70%	1,35	20,35%	7,96%	1,33	1,75%	-1,48%
25%	11,80%	1,12	25,30%	12,07%	1,11	1,21%	-0,95%

Tabela 4

Observa-se que para uma flecha inicial maior do que 10% do vão, a diferença é pequena ao se levar em conta a elasticidade.

### b Carga distribuída uniforme ao longo do vão

No caso da carga distribuída, a força de tração varia ao longo do comprimento do cabo:

$$T = T_x \sqrt{1 + \left( \frac{8fx}{l_0^2} \right)^2} \quad (17)$$

Onde  $T_x$ , a componente da tração na direção  $x$ , constante ao longo do cabo, é dada por

$$T_x = \frac{q \cdot l_0^2}{8f} \quad (18)$$

Como a força de tração, o alongamento também é variável, devendo ser

calculado em cada elemento de comprimento:

$$l = \int ds = \int (1 + \varepsilon) ds_1 = \int \left( 1 + \frac{T}{EA_m} \right) ds_1 \quad (19)$$

onde

$ds$  = elemento de comprimento do cabo esticado;

$ds_1$  = elemento de comprimento do cabo antes de esticar;

$\varepsilon$  = alongamento do elemento;

$T$  = força de tração no elemento;

$E$  = Módulo de elasticidade do cabo;

$A_m$  = área metálica do cabo.

A tração é mínima no centro do cabo, igual a  $T_x$ , aumentando até atingir o máximo na extremidade:

$$T(l_0 / 2) = T_x \sqrt{1 + \left( \frac{4f}{l_0} \right)^2} \quad (20)$$

Quando a flecha é pequena, a variação da tensão não é grande. Assim, para simplificar, será usada uma aproximação com a tensão constante ao longo do cabo, igual à tensão  $T_x$ , para fins de cálculo do alongamento.

Na Tabela abaixo mostram-se os valores da flecha final, comprimento final e força de tração para o caso elástico, e os valores do comprimento inicial (sem tensão).

com elasticidade			compr. Inicial
f/l <sub>0</sub>	l/l <sub>0</sub> -1	T <sub>max</sub> /(ql)	l <sub>1</sub> /l <sub>0</sub> -1
0,0%			-0,2427%
1,0%	0,03%	12,51	-0,2153%
2,0%	0,11%	6,27	-0,1350%
2,5%	0,17%	5,02	-0,0749%
3,0%	0,24%	4,20	-0,0015%
3,5%	0,33%	3,61	0,0852%
4,0%	0,43%	3,16	0,1849%
5,0%	0,66%	2,55	0,4237%
6,0%	0,95%	2,14	0,7142%
7,0%	1,29%	1,85	1,0555%
10,0%	2,61%	1,35	2,3754%
15,0%	5,71%	0,97	5,4921%
20,0%	9,82%	0,80	9,6153%
25,0%	14,78%	0,71	14,5827%

Tabela 5

A partir de um valor da flecha final, f/l<sub>0</sub>, foi calculado o comprimento final, l/l<sub>0</sub> - 1, pela equação (10):

$$l = l_0 \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{4f}{l_0} \right)^2} + \frac{l_0}{4f} \ln \left( \frac{4f}{l_0} + \sqrt{1 + \left( \frac{4f}{l_0} \right)^2} \right) \right]$$

O valor da força de tração máxima T<sub>max</sub>, dividido pela carga aplicada ql, foi calculado pela eq. (20).

O valor do comprimento inicial, l<sub>1</sub>, for calculada a partir do comprimento final, l, através de:

$$l = (1 + \varepsilon) l_1$$

Como no caso da força pontual, o valor do alongamento ε foi calculado em função da razão entre a carga de ruptura e a área metálica, para deixá-lo independente do diâmetro do cabo:

$$\varepsilon = \frac{T_R}{nEA_m}$$

$\varepsilon$  = alongamento,

$T_R$  = Carga de ruptura do cabo,

$A_m$  = área metálica do cabo,

$E$  = módulo de elasticidade,

$n$  = fator de segurança.

Novamente usando cabo 6x25 AACI, aço EIPS, pré-esticado, temos, conforme anexo 1, tem-se  $T_R/A_m = 152,9 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $E = 12600 \text{ kgf/mm}^2$ , resultando  $\varepsilon = 0,00243$ . Esse alongamento seria o máximo, ocorrente na extremidade. Para levar em

conta o mínimo, no centro do cabo, divide-se-o por  $\sqrt{1 + \left(\frac{4f}{l_0}\right)^2}$ .

Serão dimensionados a seguir cabos de aço para guarda-corpo, com uma carga uniformemente distribuída de 150 kgf/m, para alguns comprimentos de vão.

### **III Considerações e conclusões**

#### **a Exemplos de dimensionamento**

##### **i Linha de vida**

Inicialmente, uma linha de vida integrante de um sistema de proteção contra quedas do tipo impedimento de queda. Para esse caso, será prevista uma carga concentrada  $P=150 \text{ kgf}$ , flecha  $f = 5\%$  do vão, vãos  $l_0$  de 2 a 10 metros, fator de



segurança  $n = 5$ :

$l_0$	$f/l_0$	T/P	T	n T	d
m			kgf	tf	mm
2,00	5,00%	5,02	753,74	3,77	8,0
4,00	5,00%	5,02	753,74	3,77	8,0
6,00	5,00%	5,02	753,74	3,77	8,0
8,00	5,00%	5,02	753,74	3,77	8,0
10,00	5,00%	5,02	753,74	3,77	8,0

*Tabela 6*

A força de tração no cabo de aço é constante, pois apesar de o vão variar, a proporção entre a flecha e o vão se mantém constante. A força, com o fator de segurança, é igual a 3,77 tf, sendo que um cabo de 8 mm é suficiente.

Agora, uma linha de vida integrante de um sistema de proteção contra quedas do tipo captura de queda. Para esse caso, será estipulada uma carga concentrada  $P=800$  kgf, prevendo que seja utilizado um dispositivo absorvedor de energia, caso contrário a força pode ser muito maior. Novamente, uma flecha  $f = 5\%$  do vão, vãos  $l_0$  de 2 a 10 metros, fator de segurança  $n = 5$ :

$l_0$	$f/l_0$	T/P	T	n T	d
m			kgf	tf	mm
2,00	5,00%	5,02	4019,95	20,10	19,0
4,00	5,00%	5,02	4019,95	20,10	19,0
6,00	5,00%	5,02	4019,95	20,10	19,0
8,00	5,00%	5,02	4019,95	20,10	19,0
10,00	5,00%	5,02	4019,95	20,10	19,0

*Tabela 7*

É necessário um cabo de 19 mm.

## ii Guarda-corpo

Será dimensionado com uma força distribuída de 150 kgf/m, o que está conforme a Recomendação Técnica de Procedimentos da Fundacentro<sup>3</sup>. Serão vãos de 2 a 6 metros. A flecha será mantida sempre igual a 10 cm, independente do comprimento

do vão, pois uma flecha maior pode comprometer a função de guarda-corpo.

$l_0$	$f/l_0$	$T_{max}/(q_b)$	T	n T	d	$l_1/l_0-1$
m			kgf	tf	mm	
2,00	5,00%	2,55	764,85	3,82	8,0	0,0042
4,00	2,50%	5,02	3014,96	15,07	14,5	0,0018
6,00	1,67%	7,52	6764,98	33,82	22,0	-0,0017

*Tabela 8*

Verifica-se que a força no cabo cresce muito com o comprimento do vão, por dois motivos:

1. A força distribuída por metro é multiplicada pelo comprimento do vão.
2. Como a flecha é mantida constante em valor absoluto, a proporção entre flecha e vão diminui com o aumento do vão, e a força no cabo aumenta na mesma proporção. Para o vão de 6 metros, é necessário usar um cabo de comprimento inicial menor do que o vão, de modo que, ao ser solicitado, a flecha não ultrapasse os 10 cm.

Como a maior probabilidade de impacto em um guarda-corpo de obra é por cargas pontuais, também será feito o dimensionamento para esse tipo de carregamento, com uma intensidade de 150 kgf. Os vãos são de 2 a 8 metros e a flecha será mantida sempre igual a 10 cm.

$l_0$	$f/l_0$	T/P	T	n T	d	$l_1/l_0-1$
m			kgf	tf	mm	
2,00	5,00%	5,02	753,74	3,77	8,0	0,26%
4,00	2,50%	10,01	1501,87	7,51	11,5	0,08%
6,00	1,67%	15,01	2251,25	11,26	13,0	-0,16%
8,00	1,25%	20,01	3000,94	15,00	14,5	-0,22%

*Tabela 9*

## **b Conclusões**

O presente trabalho evidencia que o dimensionamento de sistemas de cabo de aço submetido a forças transversais deve ser feito cuidadosamente, pois as forças que surgem no cabo podem ser muito maiores que a força aplicada. Isso pode ser visto claramente no exemplo de dimensionamento de um sistema de guarda-corpo que atende a norma brasileira. Nesse caso, a força distribuída de 150 kg/m pode requerer cabos, considerando o fator de segurança igual a 5, que suportem tensões maiores que 30 tf para um vão de 6m. Para vãos maiores, pode ser o caso de se pensar em sistemas rígidos. Outra questão importante está relacionada com a necessidade de dissipação da energia cinética gerada pela queda do trabalhador nos sistemas de captura de queda. Esta questão pode ser sanada com uso de dispositivos absorvedores de energia e com a limitação da altura de queda livre. Assim, dentre outras questões, vê-se que as dimensões dos conectores de cinto de segurança, a posição vertical dos pontos de conexão dos trabalhadores ao sistema (preferencialmente acima dos trabalhadores) devem ser minuciosamente consideradas. Mesmo cuidado deve ser dispensado no cálculo da flecha gerada no cabo pelas forças aplicadas. Flechas muito grandes, no caso de guarda-corpos, podem prejudicar a sua função de impedir a queda e, no caso de linhas de vida, podem fazer com que o trabalhador venha atingir obstáculos em pontos inferiores. Flechas muito pequenas, por sua vez, podem gerar forças muito grandes as quais podem estar acima da capacidade suportada pelo sistema. Finalmente, cabe-nos salientar que este trabalho não esgota o assunto, ficando em aberto vários aspectos dos sistemas de cabo de aço sujeitos a forças transversais, tais como forças aplicadas fora do centro do vão, peso próprio do cabo e combinação de vários carregamentos. Igualmente, maior atenção pode ser dada a questão da dissipação da energia cinética de queda. Tais aspectos podem ser abordados em trabalhos futuros.

## IV Referências

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 6327 – Cabo de aço para uso geral*, Rio de Janeiro: ABNT, 2006
2. Cimaf. *Manual Técnico – 2007*. Osasco/SP: Cimaf Belgo Bekaert Arames Ltda, 2007
3. Fundacentro. *Recomendação Técnica de Procedimentos – Medidas de Proteção contra Quedas de Altura*. São Paulo: Fundacentro, 2001
4. MTE – Ministério do Trabalho e Emprego. NR 18 – *Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção*. Brasília: Portaria n. 4 de 07/07/95, 1995
5. SEGUR, *Análise de Acidentes Fatais no Rio Grande do Sul: a experiência da Seção de Segurança e Saúde do Trabalhador – SEGUR*. Porto Alegre: Superintendência Regional do Trabalho e Emprego do Rio Grande do Sul. Seção de Segurança e Saúde do Trabalhador / SEGUR, 2008
6. Zhang, Shiqiao, *The Analysis of H-shaped Horizontal Lifeline Fall Protection System - Thesis for the Degree of Master of Science in Civil Engineering*. Cincinnati: University of Cincinnati, 2002.
7. Irvine, H. Max. *Cable Structures*. Cambridge: MIT Press, 1981

## V Anexos

### 1 Características dos cabos de aço da classe 6 x 19

- Cabos de 6 pernas com 15 a 26 arames por perna;
- Boa resistência à flexão e boa resistência à abrasão;
- Classe mais utilizada, tendo as construções mais adequadas para a maior parte das construções comuns;
- Construções pertencentes à classe, e respectivos fatores para cálculo da área metálica:

<b>Construções</b>	6x19 (2 operações)	6x19 Warrington	6x19 Seale	<b>6x25 Filler</b>	6x26 Warrington-Seale
<b>Fator f p/AF</b>	0,396		0,416	0,418	
<b>p/AACI (+15%)</b>	0,455		0,478	<b>0,481</b>	

*Tabela 1*

- Módulo de elasticidade E (kgf/mm<sup>2</sup>) para classe 6x19:

	Novo			Usado ou pré-esticado (+20%)		
	E <sub>min</sub>	E <sub>max</sub>	E <sub>méd</sub>	E <sub>min</sub>	E <sub>max</sub>	E <sub>méd</sub>
AF	8500	9500	9000	10200	11400	10800
<b>AA</b>	10000	11000	10500	12000	13200	<b>12600</b>

*Tabela 2*

- Propriedades do Cabo de aço classe 6 x 19 com alma de aço:

Classe 6x19 + AACI					Construção 6 x 25 filler AACI				
Diâmetro (mm)	Massa m (kg/m)	Carga ruptura ef. $T_R$ (tf)			$A_m = f d^2$ (mm <sup>2</sup> )	Densidade = $m/A_m$ (g/cm <sup>3</sup> )	$T_R/A_m$ (tf/mm <sup>2</sup> )		
		IPS	EIPS	EEIPS			IPS (180 kgf/mm <sup>2</sup> )	EIPS (200 kgf/mm <sup>2</sup> )	EEIPS (220 kgf/mm <sup>2</sup> )
3,2	0,04	0,66	0,77		4,92	8,74	134,08	156,43	
4,8	0,1	1,5	1,75		11,08	8,67	135,44	158,01	
6,4	0,17	2,7	3,1		19,69	8,68	137,13	157,44	
8	0,27	4,1	4,8		30,76	8,68	133,27	156,02	
9,5	0,38	5,9	6,8		43,38	8,81	136	156,74	
11,5	0,53	8	9,25		63,57	8,31	125,84	145,5	
13	0,68	10,4	12,1	13,2	81,24	8,37	128,02	148,94	162,48
14,5	0,88	13,2	15,2	16,8	101,07	8,71	130,61	150,4	166,23
16	1,07	16,2	18,7	20,6	123,06	8,7	131,64	151,96	167,4
19	1,55	23,2	26,7	29,4	173,53	8,93	133,69	153,86	169,42
22	2,11	31,4	36,1	39,7	232,66	9,07	134,96	155,16	170,64
26	2,75	40,7	46,9	51,6	324,95	8,46	125,25	144,33	158,79
média:						8,68	132,16	152,9	165,83

*Tabela 3*