

Análise da Aplicabilidade da NBR 6118 Para Utilização de Cabos Compostos de Fibra de Carbono (CFCC) em Estacas de Concreto

Protendido

Igor Prado da Silveira¹

¹ PUC Minas / Instituto de Educação Continuada / igor.prado@outlook.com

Resumo

A protensão de estacas é um recurso muitas vezes economicamente vantajoso, porém devido ao contato dos elementos de fundações com meio agressivo, as estacas protendidas estão sujeitas à corrosão, causando a degradação das cordoalhas. Buscando reduzir a corrosão das armaduras ativas algumas alternativas são aplicadas, como a proteção contra ataque corrosivo por exemplo. Contudo, estas soluções são temporárias e onerosas. Conseqüentemente, a utilização de materiais não corrosivos vem sendo pesquisada para substituir o aço convencional, sendo assim uma solução permanente. Um destes materiais não corrosivos estudado é o *Carbon Fiber Composite Cable* (CFCC) que são cabos compostos de fibra de carbono. Um estudo realizado entre o *Florida Department of Transportation* e a *Florida State University* verificou que o CFCC, para protensão, equivale-se ao aço em termos de resistência. Entretanto, todo o estudo foi realizado comparando os valores de testes aos valores teóricos seguindo orientações das normas americanas do *American Concrete Institute* (ACI) e da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Este trabalho analisa se os procedimentos estabelecidos na NBR 6118 para o dimensionamento de estruturas protendidas são aplicáveis para a utilização do CFCC. Para isso calculou-se o momento máximo resistente e o comprimento de transferência para uma estaca, semelhante às testadas no estudo supracitado, tendo seção de 61x61cm², comprimento igual a 12,2m e armação ativa igual a 20 cordoalhas de 15,2mm de diâmetro de CFCC. Comparando os resultados teóricos, de acordo com a NBR 6118, e reais observa-se que a Norma Brasileira apresenta valores mais conservadores que os resultados dos testes e, portanto, poderia ser utilizada para o dimensionamento de estacas protendidas com CFCC.

Palavras-chave

Concreto protendido; Estacas; CFCC.

Introdução

Buscando melhorar a eficiência de estacas nos processos de içamento, transporte posicionamento e cravação, é comum a protensão de estacas, que implica em melhor trabalhabilidade do elemento de fundação além de um ganho de resistência a esforços de tração. Contudo, devido ao fato de tais elementos geralmente estarem em contato com meio agressivo, as armaduras ativas das estacas estão sujeitas a corrosão e conseqüentemente a rápida degradação das cordoalhas.

De acordo com ARAUJO e PANOSSIAN (2010) a durabilidade de estruturas de concreto depende de vários requisitos de projeto, execução e manutenção do elemento.

Com o intuito de reduzir os efeitos da corrosão em estacas algumas medidas são adotadas, como a proteção contra ataques corrosivos, que atua superficialmente nas estacas, por exemplo. Contudo, as medidas adotadas são provisórias e onerosas, tornando-as muitas vezes economicamente inviáveis.

Como alternativa aos métodos utilizados atualmente, a utilização de materiais não corrosivos vem sendo pesquisado para substituir o aço convencional utilizado em protensões. Um destes materiais é o *Carbon Fiber Composite Cable* (CFCC) que é produzido pela empresa japonesa Tokyo Rope MFG. CO. Ltd. O CFCC são cabos compostos por fibras de carbono, que possuem alta resistência a corrosão além de outras características interessantes, como o baixo peso, por exemplo. A figura 1, mostra alguns exemplos de diâmetros de CFCC.



Figura 1 – CFCC.

Fonte: Tokyo Rope MFG. CO. Ltd

Porém, devido à utilização do CFCC ser algo muito recente, não apenas no Brasil como em todo o mundo, não é possível afirmar se as Normas Brasileiras (NBR's) são aplicáveis para a utilização deste material, principalmente pelo fato de haver, atualmente, poucas análises teóricas e práticas sobre o tema.

Visto isto, este trabalho tem como objetivo analisar se a NBR 6118:2014 é aplicável para a utilização de CFCC em estacas de concreto protendido.

Referencial teórico

Para este trabalho, utilizou-se como base um estudo realizado pelo *Florida Department of Transportation* (FDOT) e a *Florida State University* (FSU), onde analisou-se a utilização de CFCC em estacas protendidas. Segue abaixo os aspectos analisados neste estudo.

Carbon fiber composite cables

De acordo com RODDENBERRY et al (2014) os cabos compostos por fibra de carbono podem ser a partir de dois materiais. O primeiro é uma base de poli-acrilonitrilo (PAN-Based) e o segundo é uma base de piche, sendo este um derivado de petróleo. Para o

estudo Norte Americano em questão, analisou-se o CFCC produzido pela empresa japonesa Tokyo Rope MFG. CO. Ltd., que possui as seguintes características:

(Cross section figure)	Designation	Diameter (mm)	Effective cross-sectional area (mm ²)	Guaranteed breaking load (kN)	Unit weight per meter (g/m)	Elastic modulus (kN/mm ²)
Uni-strand 	U 5.0φ	5.0	15.2	38	30	167
7 strands 	1×7 7.5φ	7.5	31.1	76	60	155
	1×7 10.5φ	10.5	57.8	141	111	155
	1×7 12.5φ	12.5	76.0	184	145	155
	1×7 15.2φ	15.2	115.6	270	221	155
	1×7 17.2φ	17.2	151.1	350	289	155
	1×7 19.3φ	19.3	186.7	445	355	155
19 strands 	1×19 20.5φ	20.5	206.2	316	410	137
	1×19 25.5φ	25.5	304.7	467	606	137
	1×19 28.5φ	28.5	401.0	594	777	137
37 strands 	1×37 35.5φ	35.5	591.2	841	1,185	127
	1×37 40.0φ	40.0	798.7	1,200	1,529	145

Figura 2 – Características do CFCC
Fonte: Tokyo Rope MFG. CO. Ltd

Caracterização dos testes realizados

De acordo com RODDENBERRY et al (2014), para analisar a eficiência de CFCC para protensão de estacas utilizaram-se cinco estacas de concreto protendido, sendo 3 com 12,2 metros de comprimento e as outras duas com 30,5 metros.

Todas as estacas eram quadradas, tendo seção igual a 61x61cm² e possuíam área de CFCC igual a 20 cordoalhas de 15,2 mm de diâmetro, distribuídos conforme, mostrado na figura 3.

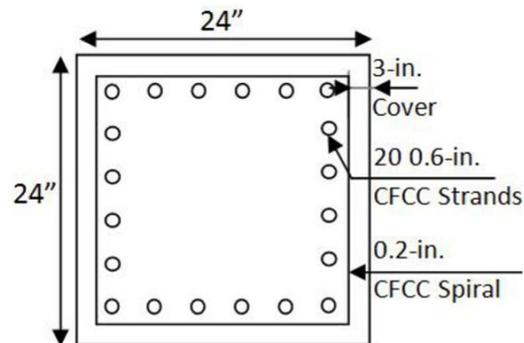


Figura 3 – Seção transversal
Fonte: Roddenberry et al (2014)

Todas as estacas foram produzidas com concreto de resistência igual a 60 MPa, sendo o mesmo de alta resistência inicial. As cordoalhas de CFCC foram cortadas no dia seguinte à concretagem, quando o concreto apresentava resistência igual a 37 MPa.

Devido a limitações instrumentais, as quatro cordoalhas posicionadas nos vértices das estacas foram protendidas com uma força inicial de aproximadamente 22 kN, apresentando alongamento desprezível nos cabos. O restante das cordoalhas foram protendidas com uma força inicial de aproximadamente 175,5 kN, com um alongamento dos cabos de aproximadamente 12,0 cm.

As duas estacas de 30,5 metros foram cravadas para analisar o comportamento dos elementos durante a cravação. As outras três estacas foram testadas em laboratório a fim de verificar o comprimento de ancoragem básico, o comprimento de transferência e consequentemente o comprimento de ancoragem necessário e também a capacidade de carga das estacas.

De acordo com FILHO e BELLA (2005) “O comprimento de transferência é o comprimento necessário para transferir por aderência, a totalidade da força de protensão ao fio, ou cordoalha, no interior da massa de concreto. [...] O comprimento de ancoragem básico é o comprimento, de ancoragem reto, necessário para ancorar uma força limite que atua em uma cordoalha ou fio de protensão. [...] O comprimento de ancoragem necessário é o comprimento ancoragem reta de projeto, necessário para ancorar a força atuante de projeto em um fio ou cordoalha de protensão.”

As seções abaixo apresentam uma breve descrição dos testes realizados.

Teste de comprimento de transferência

Para o teste de comprimento de transferência, sensores de medição de deformação foram instalados ao longo das estacas para medir a deformação do concreto. Os dados foram coletados enquanto as cordoalhas de CFCC eram cortadas, um dia após a concretagem.

Através da análise da variação de tensões no concreto ao longo das estacas determinou-se o comprimento de transferência.

Testes de flexão e comprimento de ancoragem

Os testes de flexão e de comprimento de ancoragem foram realizados 45 dias após a concretagem das estacas. Nestes testes, uma carga era aplicada nas estacas, apoiadas de acordo com as Figuras 4a e 4b.

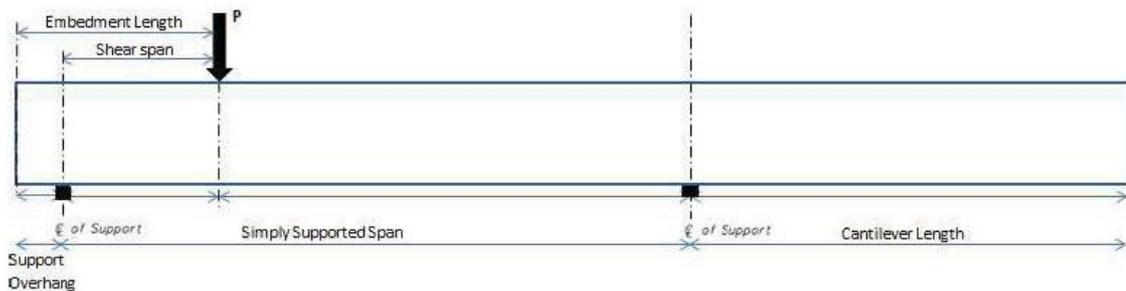


Figura 4a – Teste de comprimento de ancoragem
Fonte: Roddenberry et al (2014)

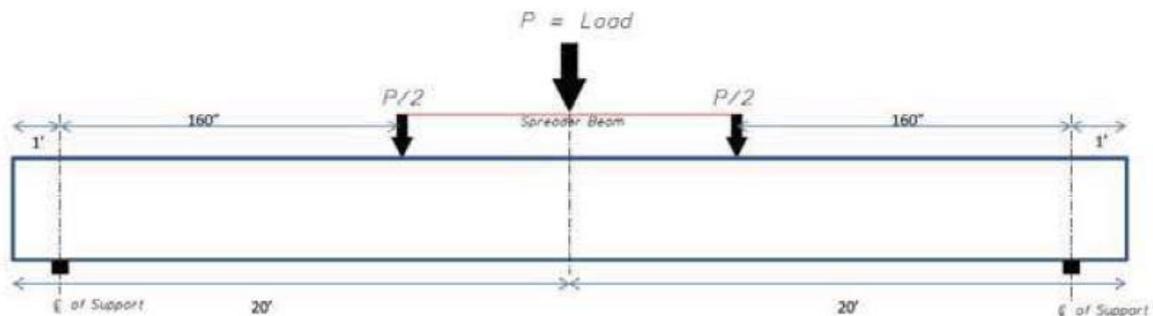


Figura 4b – Teste de flexão
Fonte: Roddenberry et al (2014)

No teste de comprimento de ancoragem, a posição da aplicação da carga variava ao longo da estaca, enquanto que no teste de flexão, a intensidade da carga aplicada variava em uma taxa de 113,4 kg por segundo. Nestes dois testes os seguintes parâmetros foram verificados:

- Comprimento de ancoragem básico;
- Deflexões em diversos pontos da estaca;
- Deformações na face superior do concreto próximas ao ponto de aplicação das cargas;
- Deslizamento das cordoalhas de CFCC;
- Capacidade máxima de carga (Momento máximo).

Metodologia

Para analisar a aplicabilidade da NBR 6118 para protensão de estacas utilizando o CFCC, calculou-se a capacidade de carga de uma estaca similar às testadas de acordo

com a norma brasileira. Calculou-se também os comprimentos de ancoragem básico, de transferência e de ancoragem necessário além de todas as perdas de cargas e posteriormente a capacidade de carga das estacas. Em seguida, compararam-se os resultados teóricos com os obtidos através dos testes.

Vale ressaltar que, uma vez que os resultados teóricos serão comparados com valores encontrados em testes, utilizaram-se para os cálculos valores característicos, ou seja, com coeficientes de majoração e/ou minoração iguais a 1,0. Sendo assim, entende-se que os valores teóricos encontrados são os mais próximos à realidade possível.

As seções abaixo demonstram os procedimentos para o cálculo destes itens.

Comprimento de ancoragem básico

De acordo com o item 9.4.5.1 da NBR 6118:2014, o comprimento de ancoragem básico para cordoalhas de três ou sete fios, que foram as utilizadas nos testes, é dado por:

$$\ell_{bp} = \frac{7 \phi f_{pyd}}{36 f_{bpd}} \quad (1)$$

Onde,

ϕ é o diâmetro da cordoalha;

f_{pyd} é a resistência ao escoamento cálculo da armadura ativa;

f_{bpd} é a resistência de aderência de cálculo da armadura ativa.

Uma vez que o CFCC apresenta comportamento no regime elástico linear até o momento da ruptura, considera-se o f_{pyd} igual à resistência a tração do CFCC, que, segundo o fabricante, é igual a 2,1 kN/mm².

O valor de f_{bpd} , necessário para o cálculo do comprimento de ancoragem básico é calculado conforme o item 9.3.2 da NBR 6118.

Comprimento de transferência

De acordo com a NBR 6118, o cálculo do comprimento necessário para transferir, por aderência, a totalidade da força de protensão ao fio, no interior da massa de concreto, considerando a liberação do dispositivo de tração de forma gradual, é dada pela seguinte equação:

$$\ell_{bpt} = 0,5 \ell_{bp} \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} \quad (2)$$

Onde,

ℓ_{bp} é o comprimento de ancoragem básico;

σ_{pi} é a tensão na armadura ativa imediatamente após a aplicação da protensão;

f_{pyd} é a resistência ao escoamento de cálculo da armadura ativa.

Comprimento de ancoragem necessário

Para o comprimento de ancoragem necessário, a NBR 6118 impõe que seja calculado da seguinte maneira:

$$\ell_{bpd} = \ell_{bpt} + \ell_{bp} \frac{f_{pyd} - \sigma_{p\infty}}{f_{pyd}} \quad (3)$$

Onde,

ℓ_{bpt} é o comprimento de transferência;

ℓ_{bp} é o comprimento de ancoragem básico;

f_{pyd} é a resistência ao escoamento de cálculo da armadura ativa;

$\sigma_{p\infty}$ é a tensão na armadura ativa após todas as perdas ao longo do tempo.

Capacidade de carga das estacas

Para o cálculo da capacidade de carga das estacas calculou-se, primeiramente, as perdas imediatas e progressivas da força de protensão nas cordoalhas de CFCC. Posteriormente, calculou-se o momento máximo resistente da estaca. Os itens a seguir demonstram os procedimentos de cálculo da capacidade de carga.

Encurtamento imediato do concreto

Segundo a NBR 6118:2014, a perda devido ao encurtamento imediato do concreto pode ser calculada conforme a equação abaixo.

$$\Delta\sigma_p = \frac{\alpha_p (\sigma_{cp} + \sigma_{cg}) (n-1)}{2n} \quad (4)$$

Onde,

α_p é a relação entre o módulo de elasticidade do CFCC e do módulo de elasticidade inicial do concreto;

σ_{cp} é a tensão inicial no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devido a protensão simultânea dos cabos;

σ_{cg} é a tensão inicial no concreto ao nível do baricentro da armadura de protensão, devido a carga permanente mobilizada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão;

n é o número de cabos.

Perdas por atrito

Uma vez que as cordoalhas de CFCC não possuem desvios ao longo das estacas, as perdas por atrito baseiam-se apenas nas curvaturas não intencionais nos cabos, contudo, estes valores foram irrisórios, uma vez que as bainhas foram lubrificadas e com isso o coeficiente de atrito (μ) foi muito baixo. Portanto as perdas por atrito foram desprezadas.

Perdas por deslizamento da armadura e acomodação da ancoragem

As perdas por deslizamento da armadura e acomodação consideradas foram de 4,58 mm, valor este recomendado pela fabricante do CFCC e do sistema de ancoragem, Tokyo Rope MFG. CO.

Retração do concreto

De acordo com a NBR 6118, as deformações devido às perdas por retração do concreto, entre o momento da liberação das cordoalhas até o momento dos testes, são dadas pela expressão abaixo.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (5)$$

Onde,

$\varepsilon_{cs\infty}$ é a retração final do concreto, calculado conforme o anexo A da NBR 6118;

$\beta_s(t)$ e $\beta_s(t_0)$ são os coeficientes relativos da retração do concreto, calculados conforme o anexo A da NBR 6118.

Fluência do concreto

De acordo com a NBR 6118, as deformações, que causam as perdas devido à fluência do concreto, até o momento dos testes, são dadas pela expressão abaixo.

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c}{E_{c,28}} \varphi(t, t_0) \quad (6)$$

Onde,

σ_c é a tensão atuante no concreto devido a protensão;

$E_{c,28}$ é o módulo de elasticidade aos 28 dias do concreto;

$\varphi(t, t_0)$ é o coeficiente de fluência.

Os itens acima são calculados conforme o anexo A da NBR 6118.

Relaxação da armadura ativa

Uma vez que a NBR 6118 não dispõe de procedimentos para o cálculo da relaxação do CFCC, utilizou-se da mesma metodologia para o cálculo da armadura de aço. Com isso, a determinação da relaxação relativa da armadura de CFCC é determinada conforme a expressão abaixo.

$$\Delta\sigma_{Pr(t,t_0)rel} = \Delta\sigma_{Pr(t,t_0)} \left[1 - \frac{2|\Delta\sigma_{P(t,t_0),c+s}|}{\sigma_{Pi}} \right] \quad (7)$$

Onde,

$\Delta\sigma_{Pr(t,t_0)}$ é a relaxação pura da armadura ativa, calculado conforme o item 9.6.3.4.5 da NBR 6118.

$|\Delta\sigma_{P(t,t_0),c+s}|$ é o módulo das perdas por fluência e retração.

σ_{Pi} é a tensão na armadura ativa anterior às perdas.

Processo de cálculo das perdas progressivas

Uma vez que as perdas por fluência, retração e relaxação ocorrem simultaneamente, deve-se considerar a interação entre elas. Dessa forma, optou-se por utilizar o método geral para a determinação das perdas progressivas, conforme item 9.6.3.4.4 da NBR 6118.

Momento máximo

Posteriormente ao cálculo das perdas de carga, calculou-se a momento máximo que a estaca suportaria até o instante da ruptura. Para isso, considerou-se uma deformação (ϵ) igual a 0,0035, sendo este valor da deformação última do concreto, de acordo com a NBR 6118. Com todos os esforços de protensão atuantes na estaca, considerando todas as perdas, foi possível elaborar o diagrama similar ao exposto na figura 5, e com isso calcular o equilíbrio dos esforços, e conseqüentemente o momento máximo resistente da estaca.

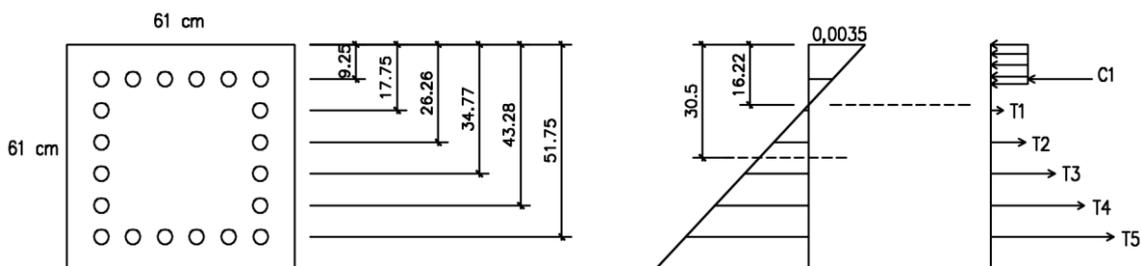


Figura 5 – Diagrama de esforços
Fonte: Roddenberry et al (2014)

Resultados

A tabela 1 mostra os resultados teóricos, obtidos conforme procedimentos da NBR 6118, e dos testes realizados por Roddenberry et al (2014), dos comprimentos de ancoragem básico, comprimento de transferência e de ancoragem necessário, como também do momento máximo resistente da estaca.

Tabela 1 – Resultados teóricos e práticos

	Teórico (NBR 6118)	Testes
Comprimento de ancoragem básico (cm)	206,89	182,88
Comprimento de transferência (cm)	75,31	63,50
Comprimento de ancoragem necessário (cm)	283,56	246,38
Momento máximo (kN.m)	967,2	1187,6

Fonte: Elaborado pelo autor



Percebe-se que em todos os quesitos os resultados teóricos foram mais conservadores do que os resultados dos testes.

Conclusão

Percebe-se que os resultados teóricos foram mais conservadores que os resultados práticos. Uma vez que os comprimentos de ancoragem, de transferência e de ancoragem necessário foram maiores segundo os procedimentos da Norma Brasileira do que os valores observados nos testes e o momento máximo resistente da estaca foi menor do que o que a estaca realmente resistiria.

Após comparação entre os resultados teóricos e dos testes, conclui-se, portanto, que a NBR 6118 poderia ser utilizada para a o dimensionamento de estacas protendidas utilizando CFCC.

Contudo, por se tratar de uma norma voltada para o dimensionamento de concreto protendido utilizando apenas aço, aconselha-se a realização de mais testes e estudos sobre o assunto a fim de aumentar a confiança de projetistas e instituições para utilização deste material.

Referências

ARAUJO, A; PANOSSIAN, Z. Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho: estudo de caso. INTERCORR, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6118 – Projetos de estruturas de concreto – Procedimento. 2014.

FILHO, J; BELLA, J. Estudo da Transferência da Força de Protensão para o Concreto em Peças Pré-tracionadas. Encontro Nacional de Pesquisa, Projeto e Produção em concreto Pré Moldado, 2005.

FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – Investigation of Carbon Fiber Composite Cables (CFCC) in Prestressed Concrete Piles. FDoT report, 2014.