

SET
03
12
01

Patrocinadores:



IBRACON Instituto
Brasileiro do
Concreto

43º Congresso Brasileiro do Concreto

18 a 23 de agosto de 2001
Foz do Iguaçu - PR
Rafain Palace Hotel

*Normalização, Comportamento
e Análise do Concreto Estrutural*

*Métodos Construtivos de
Estruturas de Concreto*

*Qualidade da Construção em
Concreto*

*Novos Materiais para Concreto
e a Reciclagem de Materiais*

“Excelência em Concreto”

N

APLICAÇÃO DE ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO NA CONSTRUÇÃO DE PASSARELAS PÊNSEIS PROTENDIDAS

Luciano Maldonado Ferreira (1)
Roberto Luiz de Arruda Barbato (2)
Mounir Khalil El Debs (3)

F383a

(1) *Engenheiro civil, mestrando em Engenharia de Estruturas, Departamento de Estruturas
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
email: lmf@sc.usp.br*

(2) *Professor associado, Departamento de Estruturas
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
email: barbato@sc.usp.br*

(3) *Professor associado, Departamento de Estruturas
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
email: mkdebs@sc.usp.br*

*Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC – USP
Av. Trabalhador Säocarlense, 400 – CEP 13566-590 – São Carlos – SP
Telefone: (16) 273-9481
Fax: (16) 273-9482*

Resumo

Este trabalho aborda um tipo de passarela que vem ganhando bastante notoriedade internacionalmente. Inúmeras obras vêm sendo construídas em diversos países, embora no Brasil ainda seja pouco conhecida. Basicamente, a estrutura é composta por cabos livremente suspensos, sobre os quais se apóia o tabuleiro formado por elementos pré-moldados de concreto. A protensão é utilizada como forma de enrijecer o conjunto. Dentre suas principais características, estão a rapidez e a facilidade de execução, a estética bastante agradável e o custo competitivo. Pretende-se fornecer uma conceituação básica, descrever algumas obras já realizadas, comentar tópicos relativos ao projeto e aos aspectos construtivos. Finalizando, é mostrada uma breve aplicação numérica.

*1224051
040302*

1 Introdução

A passarela pênsil mais primitiva é certamente aquela em que os próprios cabos funcionam como tabuleiro (v. figura 1). Apesar de bastante deslocáveis, essas estruturas foram utilizadas por diversas civilizações durante vários séculos.

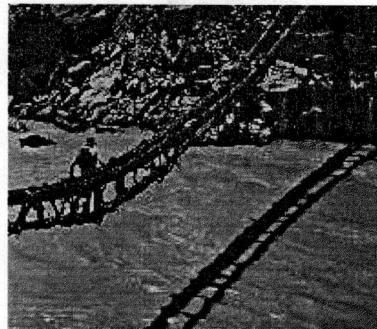


Figura 1 – Passarela pênsil primitiva.

Por volta de 1960, tal concepção estrutural foi aperfeiçoada e divulgada pelo engenheiro alemão Ulrich Finsterwalder, tornando-se desde então uma nova alternativa para os projetistas.

Basicamente, a estrutura é composta por cabos livremente suspensos sobre os quais se apóiam os elementos pré-moldados de concreto que formam o tabuleiro. A protensão é utilizada como forma de enrijecer do conjunto. Esse sistema estrutural ficou conhecido internacionalmente como *stress-ribbon*, sendo ilustrado nas figuras 2 e 3.



Figura 2 – Passarela em Nymburk, República Tcheca. (STRASKY (1999))

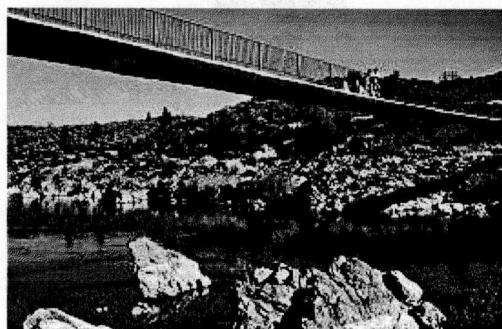


Figura 3 – Passarela em Redding, EUA. (STRASKY (1999))

A princípio, o tabuleiro pode ser formado por elementos pré-moldados de concreto de seção completa ou parcial, ou ainda moldado totalmente no local. No entanto, é no uso da pré-moldagem que se nota algumas das principais vantagens desse sistema estrutural. Nesse caso, para a montagem da estrutura, os elementos deslizam um a um sobre os cabos de sustentação até atingir sua posição de projeto (v. figura 4), tornando a execução fácil e rápida.



Figura 4 – Elemento pré-moldado deslizando até sua posição. (STRASKY (1999))

A protensão pode ser introduzida de duas formas. A primeira, mais comumente usada, é através de cabos adicionais aos de sustentação, ancorados na parte de trás dos blocos de fundação, de modo que seu único efeito são forças distribuídas verticais atuando num esquema de arco invertido, desde que os blocos de fundação sejam considerados indeslocáveis. A segunda forma de protensão produz o mesmo efeito, sendo conseguido com a colocação de uma sobrecarga (sacos de água, por exemplo) antes da concretagem das juntas. Após o concreto dessas juntas adquirir resistência suficiente, a sobrecarga é retirada e a estrutura tende a se deslocar para cima, ocorrendo o efeito de protensão desejado. A protensão através de sobrecarga foi usada na cobertura pênsil do Estádio de Montevidéu, Uruguai. No Brasil, existem duas obras que exibem esse tipo de protensão: a cobertura da Igreja Nossa Senhora das Graças, em Araraquara, e do ginásio esportivo de Rolândia. Maiores detalhes sobre essas coberturas podem ser encontrados em BARBATO (1975).

Visando ao conforto dos usuários e ao acesso de deficientes físicos, a inclinação máxima deve ser pequena e assim os cabos ficam bastante esticados. Como consequência, surgem elevadas forças horizontais que devem ser ancoradas nos apoios, condicionando sua viabilidade técnica e econômica a condições favoráveis do subsolo.

Mesmo com o custo elevado das fundações, a estrutura é competitiva economicamente, principalmente para grandes vãos e para estruturas de vãos múltiplos. A estética é bastante agradável, sendo a obra reconhecida como um marco na arquitetura local.

2 Algumas aplicações do sistema estrutural

São inúmeros os exemplos de estruturas construídas em diversos países, tais como, ex-Tchecoslováquia, Alemanha, Reino Unido, Suíça, Espanha, Uruguai, Estados Unidos e Japão. Apesar de ser possível a utilização desse sistema estrutural em pontes rodoviárias, a necessidade de flechas muito pequenas e as elevadas forças horizontais geradas, tornam seu uso menos recomendável.

FINSTERWALDER (1965) descreve a proposta de uma ponte sobre o lago Geneva. A parte central de 305 m do vão principal de 457 m seria pênsil, com apenas 250 mm de espessura de concreto armado e taxa de armadura de 25%. Embora essa ponte e outras, como a Bosporus Bridge na Turquia, a Naruto Bridge no Japão e a Zoo-bridge na

Alemanha, com vãos pêncéis de 190 m, 336 m e 166 m respectivamente, não tenham sido executadas, elas marcam o início desse sistema estrutural como uma alternativa para os projetistas.

Uma das primeiras estruturas efetivamente construída é a ponte sobre o rio Maldonado, no Uruguai (v. figura 5). O comprimento total é de 150 m, sendo que o vão principal mede cerca de 90 m. O tabuleiro é formado por aduelas de seção caixão com quatro células de 1,4 m de altura, que repousam sobre os cabos responsáveis pela sustentação. A largura total é de 9,6 m.

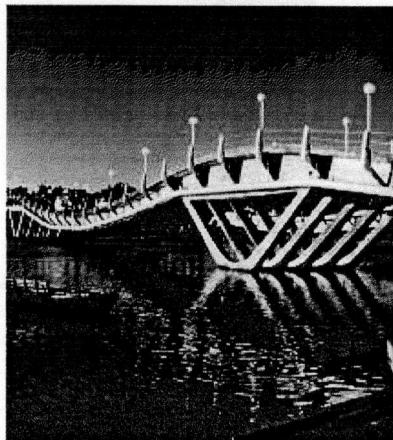


Figura 5 – Ponte sobre o rio Maldonado, Uruguai.

Mais recentemente, ganha destaque as obras projetadas pelo engenheiro Jiri Strasky. Em STRASKY & PIRNER (1986) e STRASKY (1987), são descritas uma série de passarelas construídas na ex-Tchecoslováquia. STRASKY & REDFIELD (1992) descrevem a passarela sobre o rio Sacramento em Redding, California (v. figura 3). O vão livre é de 127,41 m e a largura total é de 3,96 m. A flecha varia de 3,35 m (logo após a construção, máxima temperatura e máxima carga variável) para 2,44 m (tempo infinito e mínima temperatura). O tabuleiro tem uma espessura constante de 38,1 cm, com exceção dos trechos distantes 5,79 m dos apoios, que possuem altura variável. A variação de altura próxima aos apoios foi a solução encontrada para resistir às tensões devido aos elevados momentos fletores que surgem nessa região devido à protensão, queda de temperatura e retração do concreto.

3 O tabuleiro

Os efeitos da retração e da fluência do concreto são bastante significativos no comportamento da estrutura. A tempo infinito, corre-se o risco do tabuleiro ficar tracionado devido às perdas de protensão, implicando em problemas de durabilidade. Com o objetivo de reduzir a fluência e retração, STRASKY (1987), ao descrever uma série de passarelas construídas na ex-Tchecoslováquia, afirma que os elementos pré-moldados foram concretados de 6 a 12 meses antes da montagem da estrutura. São usados nessas obras concretos com resistências da ordem de 40 Mpa.

Em STRASKY (1999) são fornecidas algumas formas possíveis para a seção transversal das passarelas (v. figura 6):

- ✓ a alternativa a corresponde a um elemento moldado “in situ”, com as fôrmas suspensas nos próprios cabos. Nesse caso, uma das principais vantagens do sistema

- estrutural aqui discutido, a rapidez na execução, é de certa forma perdida;
- ✓ nas situações **b** e **c** são mostradas as seções utilizadas nas primeiras estruturas construídas por Strasky. Os cabos de sustentação passam sobre os elementos pré-moldados e depois da montagem, o tabuleiro é protendido por um segundo grupo de cabos. Os cabos de sustentação são protegidos com concreto moldado no local simultaneamente com a concretagem das juntas entre os elementos. A junta longitudinal entre os elementos pré-moldados e o concreto moldado no local deve ser coberta com camada impermeabilizante, já que podem ocorrer fissuras nessa interface;

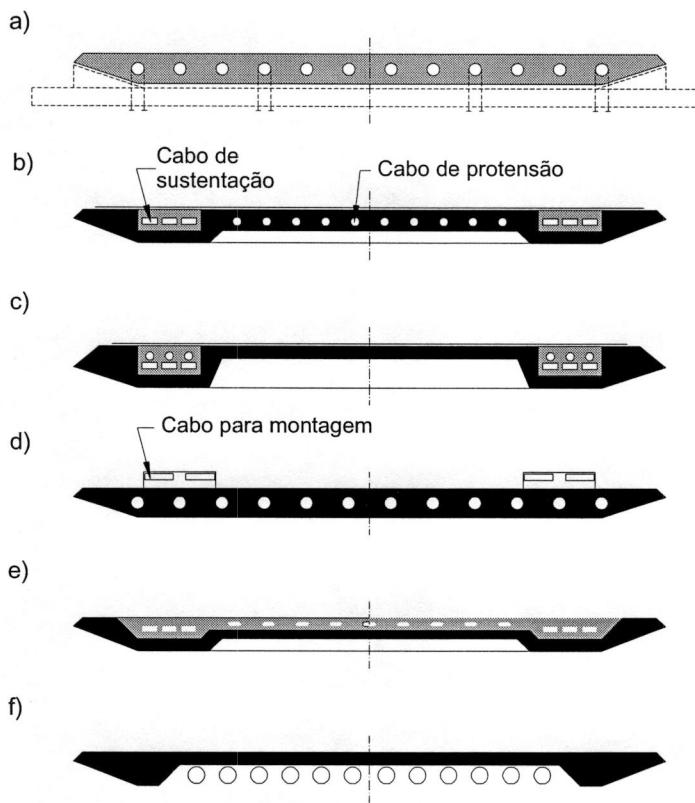


Figura 6 – Seções transversais. (STRASKY (1999))

- ✓ os elementos também podem ser montados sobre cabos que serão removidos após a protensão do tabuleiro, conforme item **d**;
- ✓ no item **f** os elementos são sustentados e protendidos por cabos externos;
- ✓ em aplicações recentes conduzidas por Strasky, estão sendo usadas seções compostas (v. item **e**). Os elementos de concreto pré-moldado são suspensos e servem de fôrma para o concreto moldado no local. A concretagem é feita simultaneamente com a moldagem das juntas entre os elementos. Tanto os elementos pré-moldados quanto os elementos compostos são protendidos. O tabuleiro contínuo proporciona ótima proteção para os cabos e requer mínimos trabalhos de manutenção.

Como já comentado anteriormente, o uso da pré-moldagem é bastante conveniente, garantindo uma execução em tempo bastante curto. As dimensões dos elementos variam de acordo com os requisitos requeridos para o projeto. O comprimento se situa em torno dos 3 m. A largura varia basicamente entre 3 m e 4 m. É possível se deixar furos no

interior dos elementos visando à passagem de encanamentos e cabos elétricos de um lado a outro da estrutura.

4 Procedimento de execução

A seguir, será fornecida a sequência de execução das passarelas pênsées formadas por elementos pré-moldados de concreto, protendidas por cabos adicionais aos de sustentação. Será abordado os casos de estruturas que possuem pilares intermediários, ou seja, de vãos múltiplos.

- a) Execução das fundações, blocos de ancoragem e pilares intermediários;
- b) Selas de aço (onde repousam os cabos) são colocadas nos apoios intermediários e os pilares são escorados temporariamente (v. figura 7);

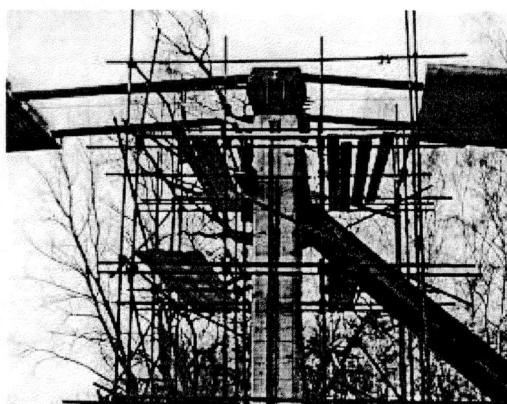


Figura 7 – Sela de aço e escora. (STRASKY & PIRNER (1986))

- c) Os cabos de sustentação são desenrolados das bobinas, cortados todos com o mesmo comprimento e dispostos no vão com o auxílio de cabos auxiliares. Em seguida, os cabos são tracionados de acordo com o projeto;
- d) Os segmentos são erguidos com o auxílio de guinchos e presos aos cabos com o auxílio de dispositivos que se instalaram em furos previamente deixados nos elementos (v. figura 8). Em seguida, os elementos são ligados a cabos auxiliares e deslizam até sua posição de projeto. Nas juntas são colocados tubos de aço. Esse processo se repete até que toda a passarela seja montada;
- e) A forma das selas é segura nos elementos vizinhos, os cabos de protensão são colocados e a armação da região dos cabos de sustentação e da sela são dispostas. As juntas, a região onde estão alojados os cabos de sustentação e as selas são concretadas ao mesmo tempo. Assim que possível, o tabuleiro protendido.
- f) Os furos onde estão instalados os cabos de protensão são concretados, é montado o corrimão e executado o pavimento. Em seguida, tem-se início a prova-de-carga (v. figura 9).

5 Comportamento estrutural

Devido às características peculiares da estrutura, diversos aspectos devem ser levados em consideração, principalmente o comportamento não-linear geométrico e as perdas de protensão.

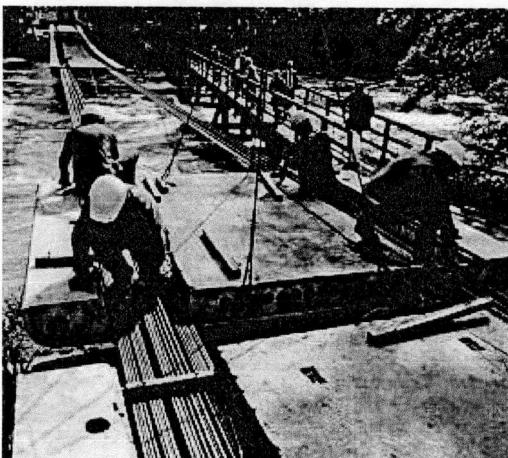


Figura 8 – Inserção de dispositivos para fixação do elemento aos cabos.
(STRASKY & PIRNER (1986))

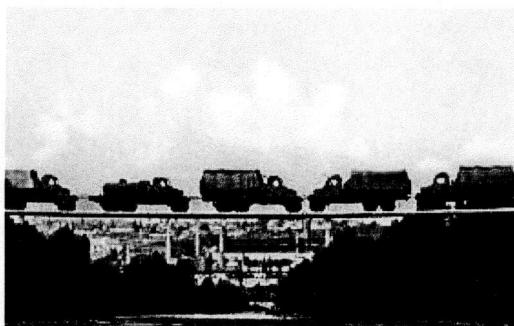


Figura 9 – Prova de carga. (STRASKY (1999))

Durante a montagem, a estrutura é suportada pelos cabos de sustentação. Sua análise é feita com as equações de equilíbrio de um cabo livremente suspenso.

Após a concretagem das juntas, a rigidez a flexão do tabuleiro deve constar nas equações de equilíbrio. Dessa forma, a estrutura se comporta como um cabo com pequena rigidez a flexão.

As equações que governam o comportamento da estrutura são idênticas às obtidas pela análise de pontes pênsil pela *deflection theory*. O desenvolvimento da formulação pode ser encontrado em DEL ARCO & BENGOCHEA (1994), DEL ARCO & BENGOCHEA (1996), e FERREIRA (2001). Obtém-se os deslocamentos verticais e os momentos fletores em cada ponto da estrutura, e a força horizontal de intensidade constante ao longo do vão.

STRASKY (1999) apresenta os diagramas de momentos fletores típicos para esse tipo de passarela pênsil, mostrados na figura 10.

A situação **b** da figura 10 corresponde à estrutura sem protensão e na situação **c** a protensão atua. Como a protensão deve estar sempre presente, o caso **b** tem caráter apenas conceitual. Como pode ser observado, momentos fletores elevados só ocorrem na região dos apoios. De acordo com STRASKY (1999), uma seção transversal típica não tem condições de suportar esses momentos. Como alternativas para solucionar o problema são apresentadas duas opções. A primeira maneira é fazer com que o tabuleiro

possa se elevar após a protensão ou quando a temperatura cai (v. figura 11b). A segunda alternativa é incorporar à estrutura pequenos arcos de espessura variável moldados no local (v. figura 11c). Nesse caso, embora os momentos fletores sejam maiores em comparação com tabuleiros de espessuras constantes, as tensões resultantes são menores. Esses arcos são projetados como peças parcialmente pretendidas e devem ser suficientemente armados com barras situadas nas suas fibras inferiores.

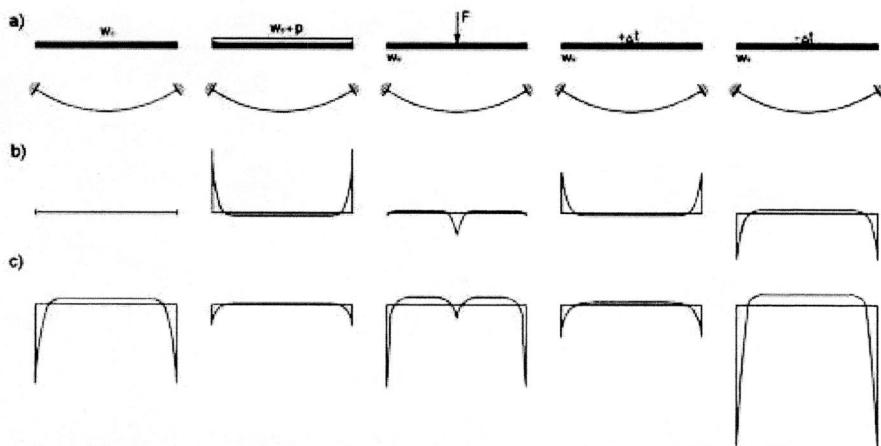


Figura 10 – Diagramas esquemáticos de momentos fletores. (STRASKY (1999))

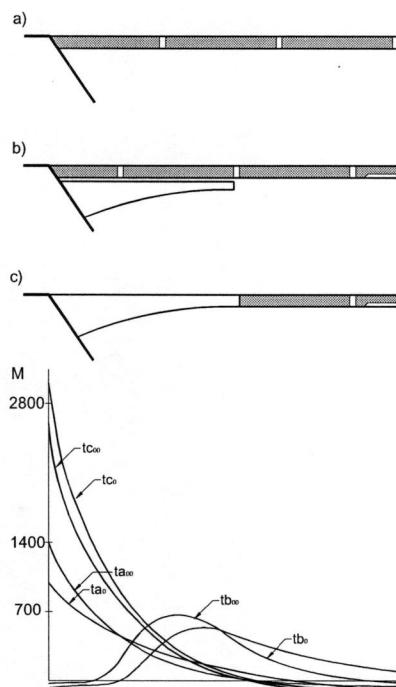


Figura 11 – Momentos fletores nos apoios devido à retração e à fluência do concreto. (STRASKY (1999))

O uso de apoios intermediários é bastante conveniente, pois permite vencer maiores distâncias com o valor da força horizontal correspondente a um vão. A fim de evitar que os pilares intermediários sofram esforços de flexão, usa-se uma articulação na sua base, sendo portanto um pilar pendular.

6 Breve aplicação numérica

A aplicação numérica tem por objetivo fornecer uma ordem de grandeza dos valores envolvidos no cálculo de uma passarela pênsil pretendida engastada em suas extremidades.

6.1 Dados para a análise

A passarela a ser analisada possui 40 m de vão, podendo ser vista na figura 12. A flecha inicial adotada é 1 m, ou seja, vão/40.

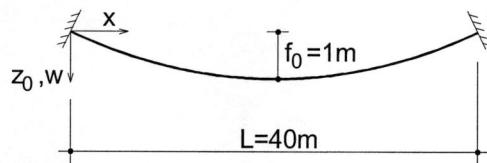


Figura 12 – Esquema longitudinal da estrutura.

A seção transversal dos elementos pré-moldados deve ter espaço suficiente para alojar os cabos de sustentação e de protensão. Em se tratando de um pré-dimensionamento, adotou-se a seção mostrada na figura 13, sendo:

$$\begin{aligned} \text{Área} &= 0,88 \text{ m}^2 \\ \text{Inércia} &= 0,0070 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

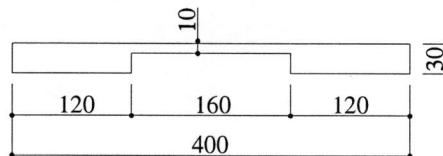


Figura 13 – Seção transversal adotada.

Os materiais empregados possuem as seguintes características:

Aço: CP-190 RB 12,7	
$f_{ptk} = 1900 \text{ MPa}$	
$f_{pyk} = 1710 \text{ Mpa}$	
$E_s = 195000 \text{ MPa}$	

Concreto	
$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$	
$E_c = 33000 \text{ MPa}$	

Ações:

$$\begin{aligned} g_1 &= 22 \text{ kN/m (peso dos elementos pré-moldados por metro linear)} \\ g_2 &= 5 \text{ kN/m (peso do pavimento e do corrimão por metro linear)} \\ q &= 20 \text{ kN/m (ação variável devido aos pedestres por metro linear)} \\ \Delta T &= -15^\circ\text{C (variação de temperatura)} \end{aligned}$$

Cabos de sustentação: 6 cabos de 12 cordoalhas $\phi 12,7\text{mm}$ – $A_s = 71,06 \text{cm}^2$.

O valor da protensão, cujo efeito é mostrado na figura 14, deve ser tal que não ocorra tração no centro do vão sob nenhuma combinação de ações. Para o exemplo, adotou-se $P = 10000 \text{kN}$.

Cabos de protensão: 4 cabos de 19 cordoalhas $\phi 12,7\text{mm}$ – $A_s = 75,01 \text{cm}^2$.

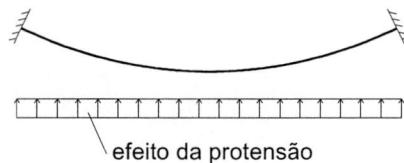


Figura 14 – Efeito da protensão na estrutura.

6.2 Resultados

Os resultados obtidos são mostrados na tabela abaixo e nas figuras 15 e 16.

Caso	Ações	Força hor. (kN)	$M(0)$ (kN.m)	$M(L/2)$ (kN.m)	$w(L/2)$ (m)
1	g_1+g_2+P	-7650,46	560,27	-179,16	-0,090
2	$g_1+g_2+P+\Delta T$	-6867,44	855,69	-263,15	-0,135
3	$g_1+g_2+P+\Delta T+q$	-3189,74	635,48	-166,45	-0,090

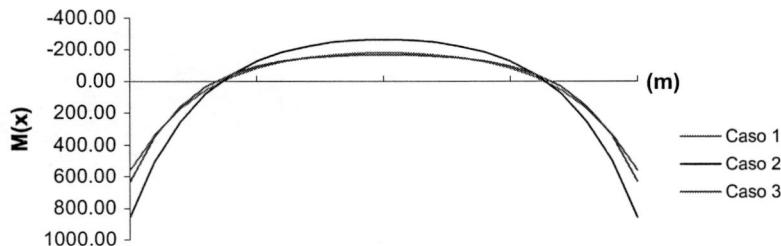


Figura 15 – Diagramas de momentos fletores.

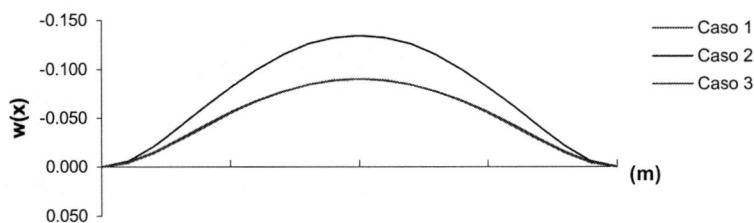


Figura 16 – Gráficos de deslocamentos.

Vale observar que ocorrem tensões elevadas nos trechos distantes cerca de 4 m das extremidades. Essa região deve ser cuidadosamente estudada em se tratando de um projeto. Em geral, como solução, adota-se um ligeiro engrossamento da seção transversal nessa região, podendo-se recorrer a uma transição moldada no local e convenientemente armada.

Conforme ilustrado nos resultados obtidos acima, as inclinações ao longo da estrutura diminuem com a aplicação da protensão. As perdas de protensão, que não foram aqui calculadas, acentuam ainda mais esse processo.

7 Considerações finais

Apesar de pouco conhecida no Brasil, nota-se um crescente uso das passarelas pênsées em diversos países. Entre suas principais vantagens estão a estética bastante agradável, a rapidez e facilidade de montagem. Economicamente, a estrutura é competitiva, principalmente em duas situações:

- a) Uso de longos vãos: as fundações não representam uma parcela tão significativa em relação ao custo total da obra;
- b) Uso de estruturas de vãos múltiplos: nesse caso, a força horizontal corresponde apenas à do maior vão. Conclui-se que o custo por metro quadrado de passarela diminui com o aumento no número de vãos.

Caso as condições do subsolo sejam inadequadas, ainda é possível associar um arco de concreto à estrutura. Além de reduzir a flecha e as declividades, a grande vantagem aqui introduzida é a possibilidade de se utilizar uma escora ligando a extremidade do tabuleiro às fundações do arco. Dessa forma, a força horizontal nos cabos é balanceada contra a componente horizontal do arco (v. Figura 17). Esta solução foi adotada na passarela sobre o rio Radbuza em Plzen, República Tcheca (v. figuras 17 e 18).

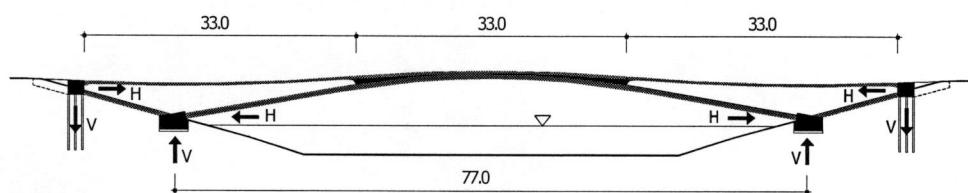


Figura 17 - Passarela em Plzen – vista lateral. (STRASKY (1999))

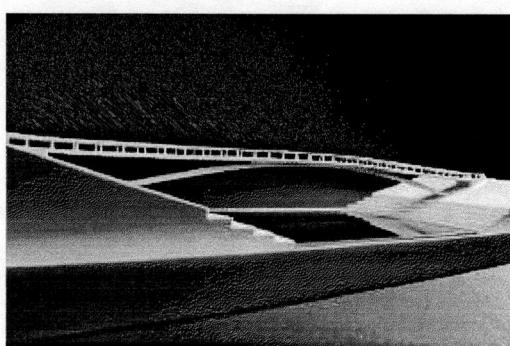


Figura 18 - Passarela em Plzen – modelo arquitetônico. (STRASKY (1999))

As passarelas pênsées são bastante susceptíveis a ações dinâmicas devido a sua baixa rigidez a flexão, pequena massa, baixa freqüência natural e baixo amortecimento. Portanto, o comportamento dinâmico precisa ser verificado ainda em fase de projeto.

De acordo com PIRNER & FISCHER (1998), experimentos recentes mostram que o comportamento dinâmico das passarelas é favorável. O perigo de vibrações devido ao vento pode ser evitado com procedimentos adequados de projeto, incluindo análise teórica e ensaios em túneis de vento. A passarela responde satisfatoriamente a ação de pedestres, desde que sua rigidez e seu amortecimento estejam dentro de limites pré-estabelecidos. A ação de vândalos, apesar de poder causar excesso de vibração, não danifica a estrutura.

As passarelas pênsis são um exemplo nítido da conveniente associação entre cabos e concreto pré-moldado, tirando proveito das qualidades de ambos os materiais.

Referências

BARBATO, R.L.A.. **Contribuição ao estudo das coberturas pênsis em casca protendida de revolução.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1975.

DEL ARCO, D.C.; BENGOCHEA, A.C.A.. **Analytical and Numerical Static Analysis of Stress Ribbon Bridges.** In: Procedings of the Centenary Year Bridge Conference, Cardiff, U.K., 26-30 sep., 1994.

DEL ARCO, D.C.; BENGOCHEA, A.C.A.. **La banda tesa de hormigón pretensado. Un esquema estructural para pasarelas .** Hormigón y Acero, n.201, p.43-62, 1996.

EL DEBS, M.K.. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações .** São Carlos, Projeto Reenge, 2000.

FERREIRA, L.M.. **Passarela pênsil protendida formada por elementos pré-moldados de concreto.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

FINSTERWALDER, U.. **Pretressed Concrete Bridge Construction.** Journal of the American Concrete Institute, p.1037-1046, sep., 1965.

PIRNER, M.; FISCHER, O.. **Wind-induced vibrations of concrete stress-ribbon footbridges.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.74-6, p.871-881, apr., aug., 1998.

REDFIELD, C.; STRASKY, J.. **Stressed Ribbon Pedestrian Bridge Across the Sacramento River in Redding, California, USA .** L'Industria Italiana del Cemento, v.62, n.2, p.82-99, 1992.

SCHLAICH, J.; ENGELSMANN, S.. **Stress Ribbon Concrete Bridges .** Structural Engineering International, v.6, n.4, p.271-274, 1996.

STRASKY, J.. **Precast Stress-Ribbon Pedestrian Bridges in Czechoslovakia .** PCI Journal, v.32, n.3, p.52-73, may, june, 1987.

STRASKY, J.. **Stress-Ribbon Pedestrian Bridges .** In: International Bridge Conference, Pittsburgh, 1999.

STRASKY, J.; PIRNER, M.. **DS-L Stress-Ribbon Footbridges .** Dopravni stavby, Brno, Czechoslovakia, 1986.

WALTHER, R.. **Stressed Ribbon Bridges**. International Civil Engineering Monthly, v.II, n.1, p.1-7, 1971.