



## **SOBRE EFEITO DO VENTO EM CABOS DE PONTES SUSPENSAS**

Daniel de Souza Machado\*

**RESUMO:** *O desenvolvimento tecnológico provocou o aumento da construção de pontes suspensas por cabos no Brasil. Estas pontes caracterizam-se pelas lajes esbeltas (mais flexíveis) e pelos grandes vãos atingidos devido a utilização de cabos de suspensão do tabuleiro, conseqüentemente as pontes suspensas têm seus projetos controlados predominantemente por resposta dinâmica a ventos turbulentos. As vibrações em cabos de pontes suspensas aparecem como um dos maiores problemas causados pelo efeito do vento em pontes suspensas. Este trabalho objetiva fazer revisão bibliográfica sobre vibrações induzidas pela ação dinâmica do vento em cabos de pontes suspensas bem como apresentar dispositivos aerodinâmicos para redução ou até eliminação destas vibrações.*

**Palavras-chave:** Vento; Pontes Suspensas; Vibrações.

### **INTRODUÇÃO**

Engenheiros inventaram o conceito de pontes estaiadas muito cedo, na mesma época em que se iniciou o desenvolvimento das pontes suspensas por cabos, porém, com o colapso da ponte sobre o rio Tineed e Saale, no início do século IX, foi abandonada esta idéia. Roebling e outros introduziram posteriormente cabos estaiados em pontes para reduzir a deformabilidade como foi feito na ponte do Brooklin, e alguns sistemas inovativos de suspensão foram inventados. A primeira ponte estaiada foi construída por Eduardo Torroja em 1920 e por Albert Caquot em 1952, mas o real desenvolvimento veio da Alemanha com trabalhos publicados por Fraz Dischinger com uma série de famosas pontes sobre o rio Rhine (VIRLOBEUX, 1999).

Pontes suspensas por cabos possibilitaram o desenvolvimento de lajes esbeltas (mais flexíveis) e de grandes vãos, porém limitados, predominantemente controlados por resposta dinâmica a ventos turbulentos. As vibrações em cabos aparecem como um dos maiores problemas dinâmicos em pontes suspensas. Este trabalho objetiva fazer revisão bibliográfica sobre vibrações induzidas pela ação dinâmica do vento em cabos de pontes suspensas bem como apresentar dispositivos aerodinâmicos para redução ou até eliminação desta vibrações.

### **EFEITOS AERODINÂMICOS**

Muitas pontes estaiadas têm sofrido importantes vibrações devido à ação do vento em cabos de pontes suspensas. Infelizmente, muitos construtores e projetistas ignoram ou desconhecem este problema e só o levam em consideração com o passar dos anos para tentar resolvê-los.

Existem diversos fatores que podem produzir vibrações em cabos. Nos capítulos seguintes serão detalhados cada uma dos efeitos dinâmicos causados pelo vento em cabos de pontes suspensas.

---

\* Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil, Estruturas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Professor substituto da Universidade Federal da Bahia – [machado\\_dsm@yahoo.com.br](mailto:machado_dsm@yahoo.com.br) (Autor)



## Desprendimento de vórtices

Em corpos de forma não aerodinâmica este efeito aparece quando o corpo é imerso em escoamento, aparece desprendimento de pares de vórtices a partir de certo número de Reynolds (ou de certa velocidade), “Figura 1”. Conhecidos como vórtices de Von Kármán, este desprendimento dá origem às forças transversais ao sentido do escoamento e consequentemente movimentos nesta direção (LIMA, 2003).

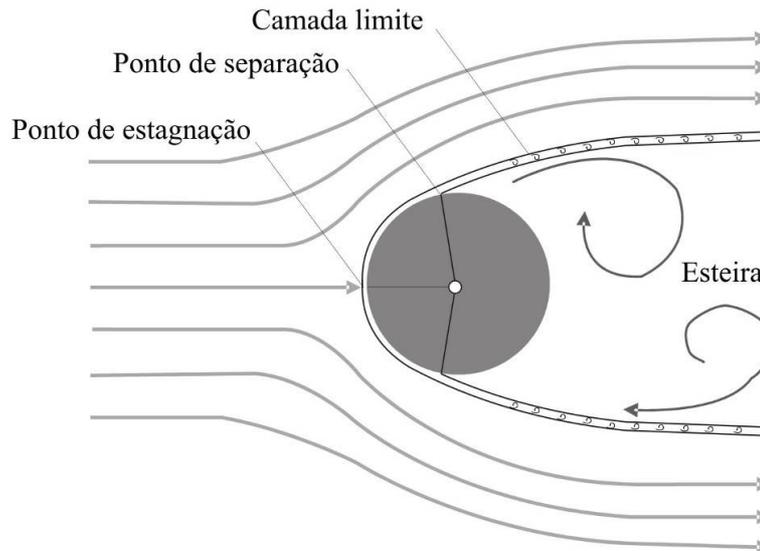


Figura 1 - Desprendimento de vórtices em seção cilíndrica.

A frequência da excitação é dada pela “equação (1)”.

$$f_s = \frac{VSt}{D} \quad (1)$$

onde,  $V$  é a velocidade do vento,  $D$  é o diâmetro do cabo e  $St$  é o número de Strouhal.

O número de Strouhal “equação (2)”,  $St$ , é um parâmetro de grande importância, que estabelece relação entre frequência e desprendimento de um par de vórtices,  $f_s$ , as dimensões do cilindro,  $D$  e a velocidade do vento,  $V$ :

$$St = \frac{f_s D}{V} \quad (2)$$

O número de Strouhal depende da forma da seção, oscilação do cilindro, rugosidade superficial, número de Reynolds,  $Re$  e das características do escoamento. Está representado abaixo o número de Strouhal,  $St$ , para seção circular a qualquer direção do vento para três faixas de variação do número de  $Re$ .

$$10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5 \text{ para } St = 0,20 \quad (3)$$



$$2 \times 10^5 \leq R_e \leq 10^6 \text{ interpolar linearmente (4)}$$

$$R_e \geq 10^6 \text{ para } St = 0,28 \text{ (5)}$$

O número de Reynolds é dado por:

$$R_e = 70000V_m d \text{ (6)}$$

Em cilindros flexíveis (cabos) com amortecimento estrutural pequeno, aparece forte oscilação transversal quando a frequência de desprendimento de vórtices,  $f_s$ , coincide com a frequência natural do cabo. Define-se velocidade crítica  $V_{cr}$  “equação (7)”, aquela que ocorre quando as frequências citadas acima coincidem (BLESSMANN, 2005).

$$V_{cr} = \frac{f_s D}{S_t} \text{ (7)}$$

## Influência do movimento do cilindro

O movimento do cilindro exerce algum controle sobre o desprendimento de vórtices. É o fenômeno conhecido como captura ou sincronização (lock-in, lock-on). Neste fenômeno observam-se oscilações também para velocidades nas vizinhanças da velocidade crítica,  $V_{cr}$ , quando a velocidade do escoamento aumenta ou diminui de modo que a frequência de um par de vórtices,  $f_s$ , aproxima-se da frequência natural do cilindro sem atingi-la e este oscila (BLESSMANN, 2005).

Além do efeito de captura, o movimento do cilindro causará efeitos como: aumento da energia contida nos vórtices; melhoramento da sua correlação longitudinal (ao longo do eixo do cilindro); aumento da força de arrasto.

## Galope

Estruturas ou elementos estruturais leves e flexíveis, com pequeno amortecimento, podem sofrer oscilações causadas pelo efeito de galope.

A forma do cabo pode produzir galope. Por exemplo, para reduzir as forças de arrasto nos cabos (que é maior para grandes vãos) engenheiros propuseram cabos na ponte Normandie em um arranjo hexagonal liso. Porém, esta forma pode produzir forças de suspensão e potentes efeitos de galope. É preferível a utilização de ductos de seção circular para evitar estas possibilidades (VIRLOBEUX, 1999).

## Martelamento

O martelamento (em inglês, buffeting) é definido como um carregamento variável de uma estrutura pelas flutuações de velocidade do escoamento incidente (SIMIU e ESCANLAN, 1978).

Uma estrutura situada na esteira de outra semelhante está sujeita aos turbilhões gerados por esta estrutura “Figura 2”. Este efeito pode atingir grandes valores quando a frequência de excitação pelo martelamento coincidir com a frequência natural da estrutura a sotavento



(martelamento ressonante). Além da frequência, também influirá a intensidade de turbulência do vento incidente. O termo em inglês (buffeting) também é usado para designar a excitação de uma estrutura por uma rajada de vento (BLESSMANN, 2005).

Este efeito cresce com a velocidade e tem efeito direto sobre os cabos. Pode produzir um tipo específico de instabilidade aerodinâmica em pontes com dois planos paralelos de cabos estaiados; rajadas atingem os cabos do primeiro plano e depois atingirá os cabos do segundo plano no tempo  $B/V$  depois, onde  $B$  é a distância entre os dois planos e  $V$  é a velocidade. Se a diferença corresponde à metade do ciclo do movimento torsional, uma instabilidade pode ocorrer. A velocidade crítica,  $V_{cr}$  é dada pela “equação (8)”.

$$V_{cr} = \frac{2B}{T_t} \quad (8)$$

onde  $T_t$  é o período no modo  $t$ .

Os efeitos de esteiras são de diferentes tipos. Cabos podem ser afetados por esteiras formadas por outras estruturas ou mesmo por outros cabos vizinhos de uma mesma ponte suspensa. A velocidade crítica,  $V_{cr}$ , do desprendimento de vórtices para este caso é dada pela “equação (9)”.

$$V_{cr} = \frac{D}{S_t T_k} \quad (9)$$

onde  $D$  é o diâmetro do cabo,  $S_t$  é o número de Strouhal e  $T_k$  o período do cabo no modo  $k$ .

Outra situação é quando existem dois cabos instalados juntos, “Figura 2”. Ocorre que um deles será afetado pelo efeito de martelamento gerado pelo desprendimento dos vórtices formados no outro cabo. O cabo em que ocorre o desprendimento dos vórtices (cabo de barlavento) acaba por perturbar o escoamento do outro cabo (cabo de sotavento), fazendo com que os dois vibrem.

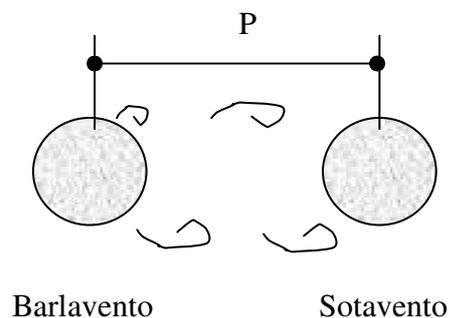


Figura 2 - Efeito do martelamento em cabo de sotavento.

Um problema específico do mesmo tipo ocorre quando cabos são feitos por um feixe paralelo, protegido individualmente (técnica desenvolvida por Freyssinet). Devido à interação entre cabos e vento, o mais externo move-se para dentro e para fora se chocando com os mais internos e conseqüentemente produzindo vibrações globais. Estas vibrações provocam um enorme e desagradável barulho devido o choque entre cabos.



O período natural de vibração do cabos para o modo de vibração  $k$  é dado pela “equação (10)”.

$$T_k = \frac{2l}{k} \sqrt{\frac{m}{F}} \quad (10)$$

onde  $l$  é o comprimento do cabo,  $m$  é a massa por unidade de comprimento e  $F$  é a tensão no cabo em Newtons. Essa equação não se aplica ao primeiro modo vertical devido o efeito de flecha. Portanto, para o primeiro modo, o período será dado pela “equação (11)”.

$$T_1 = 2l \sqrt{\frac{m}{F \left( 1 + \frac{ES \pi^2 f^2}{2l^2} \right)}} \quad (11)$$

onde  $S$  é a área do cabo,  $E$  é o módulo de Young, e  $f$  é a flecha do cabos marcada perpendicularmente ao segmento junto da ancoragem, podendo ser estimada pela “equação (12)”.

$$f = \frac{4pl^2 \cos \alpha}{\pi^3 F} \quad (12)$$

onde  $p$  é o peso por unidade de comprimento do cabo e  $\alpha$  é o ângulo de inclinação.

A amplificação para o modo  $k$  do cabo correspondente é dada pela “equação (13)”.

$$\rho = \frac{2\omega^2}{k\pi\omega_k^2} H(\omega) \quad (13)$$

O fator de amplificação dinâmica é dado pela “equação (14)”.

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_k} \right)^2 \right)^2 + \left( 2\xi \left( \frac{\omega}{\omega_k} \right) \right)^2}} \quad (14)$$

pode também ser escrito pela “equação (15)”.

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left( 1 - \frac{f^2}{f_k^2} \right)^2 + 4\xi^2 \frac{f^2}{f_k^2}}} \quad (15)$$

A frequência natural é dada pela “equação (16)”.

$$f_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (16)$$

E o amortecimento crítico é dado pela “equação (17)”.



$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{4\pi m f_k} \quad (17)$$

## AÇÕES MITIGADORAS

### Aumento da frequência natural

Pode-se evitar a ressonância com o aumento da frequência natural da estrutura, de modo que se obtenha  $V_{cr} \gg V_{max}$ , sendo  $V_{max}$  a velocidade máxima adotada para o projeto. (BLEVINS, 1977).

### Dispositivos aerodinâmicos para suspensão de vórtices

Dispositivos estudados nas últimas décadas para supressão do desprendimento de vórtices em cilindros são mostrados a seguir:

- Luvas perfuradas
- Luvas de lâminas longitudinais
- Lâminas helicoidalmente dispostas

As luvas perfuradas fragmentam o escoamento produzindo um grande número de pequenos vórtices o qual impede a formação do desprendimento dos pares de vórtices. Este efeito é análogo ao produzido pela turbulência do vento “Figura 3”.

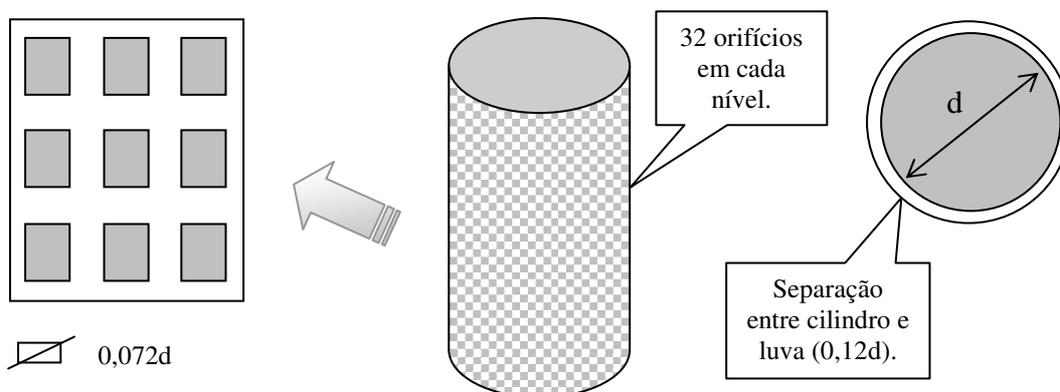


Figura 3 - Luvas perfuradas – perspectiva, corte e detalhe dos orifícios.

Perfurações quadradas apresentaram o melhor resultado com índice de vazios de 20% a 36% e uma separação entre cilindro e luva de 12% do diâmetro.



As luvas de lâminas longitudinais canalizam a energia da região de barlavento para as partes laterais e de sotavento de modo a interferir na formação de vórtices “Figura 4”. Este tipo de luva apresenta maior eficiência que as luvas perfuradas. Sugere-se utilizar índices de vazios de 40%.

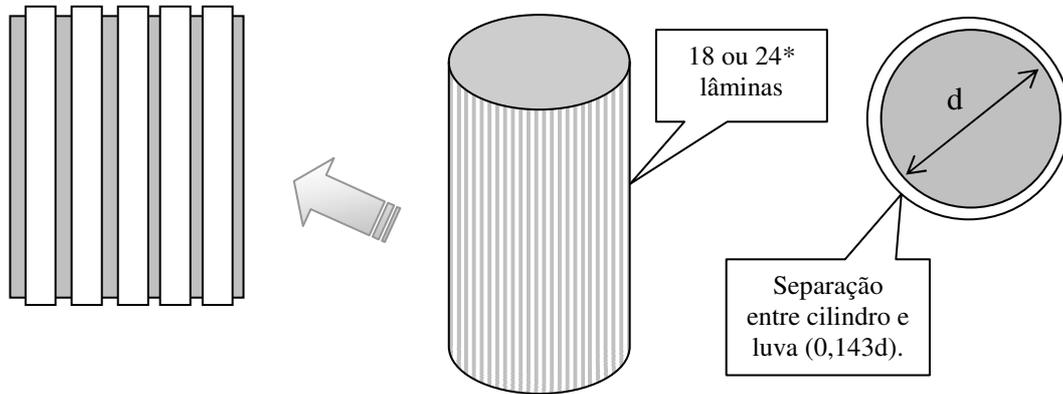


Figura 4 - Luvas de lâminas longitudinais – perspectiva, corte e detalhe dos orifícios.

Lâminas helicoidais dispostas em torno de cilindros cortam a correlação do desprendimento de vórtices que ocorrem em cilindros de seção constante. Este dispositivo faz com que os vórtices se desprendam em diferentes geratrizes da seção, além de os defasarem no tempo “

Figura 5”.

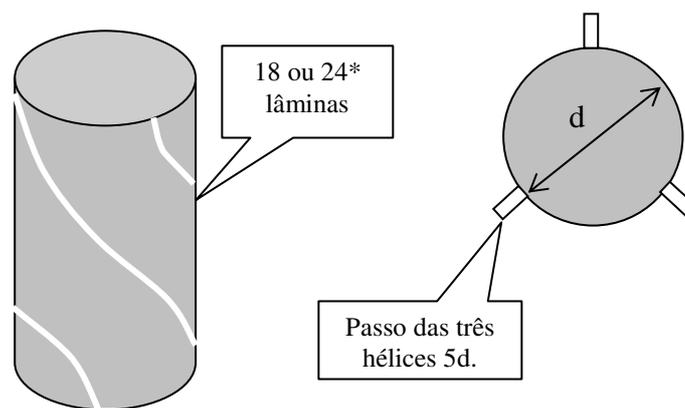


Figura 5 - Lâminas helicoidais – perspectiva, corte e detalhe dos orifícios.

Virlobeux (1999) cita a criação de fios helicoidais, medindo mais que 1mm de diâmetro e extensão de 60cm nos cabos da ponte de Normandia, o coeficiente de arrasto (coeficiente que relaciona a força no cabo na direção do vento) para esta ponte foi 0,63.



## Amortecimento da estrutura

Diferentes tipos de amortecedores podem ser usados para reduzir muitos efeitos. Considera-se que geralmente problemas de vibrações induzidas pelo vento podem ser totalmente eliminados para razão e amortecimento crítico acima de 0,5%.

Segundo Virlobeux (1999), amortecimento em cabos é um elemento decisivo em projeto, o amortecimento deve ser considerado necessário em alguns cabos.

Uma solução para mudar o período de vibração dos cabos é amarrá-los por cabos transversais como foi feito na ponte de Normandie “Figura 6”. No entanto estes cabos transversais devem receber tensões muito altas para evitar o choque dos cabos devendo deste modo ser introduzidos sistemas de amortecimento nos cabos transversais.

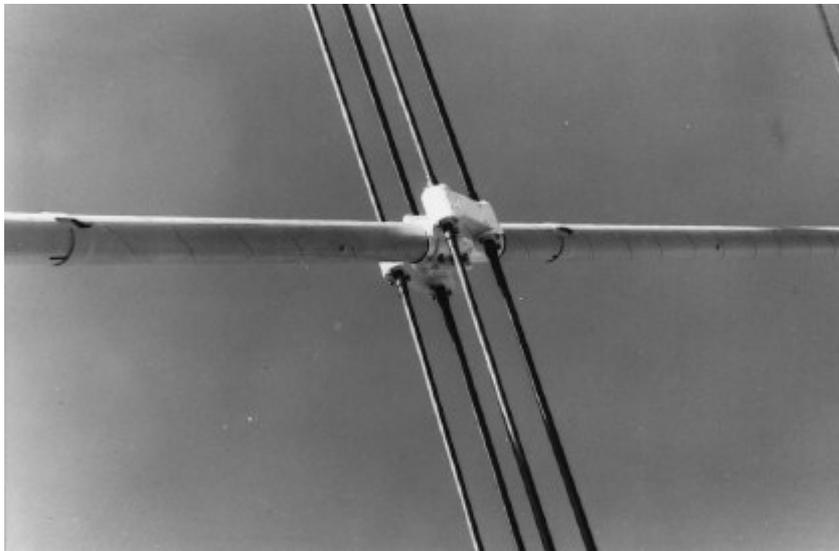


Figura 6 - Cabos estaiados amarrados por cabos transversais.

Os mesmos cabos transversais também são utilizados para outros propósitos, aumentar a rigidez do sistema de cabos estaiados evitar efeitos de esteira em cabos finos e finalmente evitar vibrações induzidas por chuva e vento (VIRLOBEUX, 1999).

Vibrações causadas por chuva e vento provocam as maiores amplitudes de vibração em cabos de pontes estaiadas. Basicamente este tipo de vibração é provocado pela formação de filetes d’água que alteram a seção transversal dos cabos e conseqüentemente a distribuição das pressões do vento. A eliminação das vibrações causadas por chuva e vento consiste da modelagem dos dutos de forma que elimine a formação dos filetes d’água. Este dispositivo aerodinâmico foi aplicado pela primeira vez no Japão, na ponte Higachi Kobe Bridge. Os sulcos longitudinais (canais) são esculpidos facilmente nos dutos de polietileno de alta densidade, no entanto com uma importante desvantagem; o coeficiente de arrasto aumenta em relação a seção lisa ( $Ca = 1,35$ ) “Figura 7”.

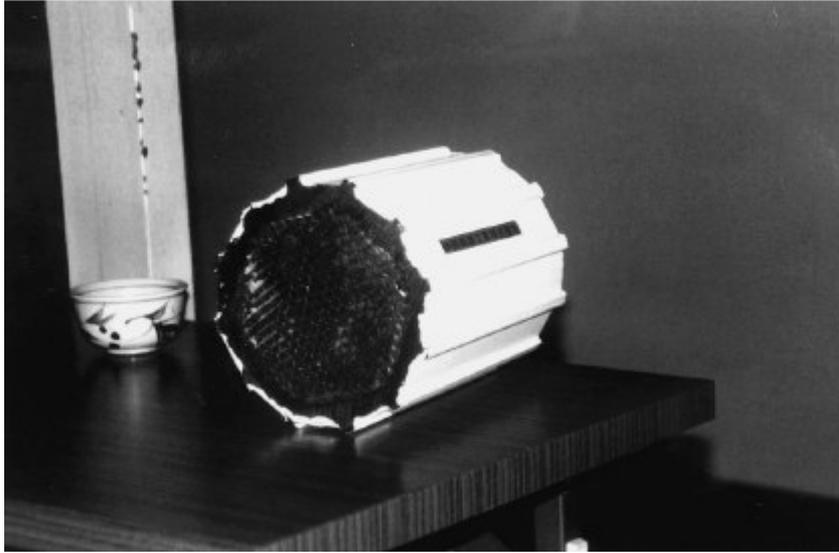


Figura 7 - Seção típica dos cabos estaiados usados na ponte Higachi Kobe, Japão.

Na ponte de Tatara, engenheiros japoneses decidiram distribuir mossas ao longo da superfície dos dutos para eliminar a formação dos filetes d'água e reduzir os efeitos combinado de chuva e vento, "Figura 8".

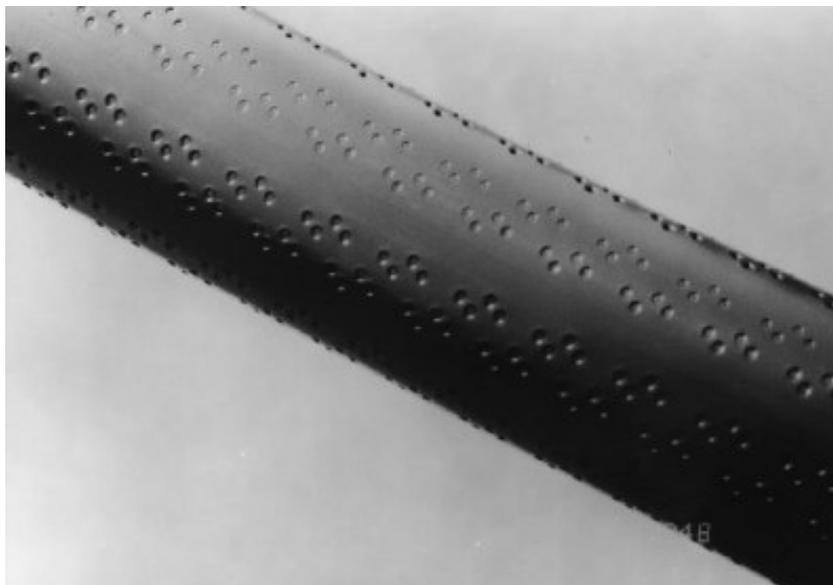


Figura 8 - Pequenas mossas ao longo da superfície dos dutos dos cabos da ponte de Tatara.



## COMENTÁRIOS GERAIS

Este trabalho reuniu conceitos e equações determinantes das vibrações induzidas por vento em cabos de pontes suspensas, sendo eles dispostos isoladamente ou acompanhados por cabos vizinhos que tendem a provocar perturbações nos demais devido à turbulência. É importante que estudantes e profissionais tomem conhecimento dos efeitos dinâmicos causados pelo vento em estruturas esbeltas de edifícios, torres, passarelas e no caso particular, estruturas de pontes suspensas.

## REFERÊNCIAS

BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento.** 2.ed. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

GU, M E DU, X. **Experimental investigation of rain-wind-induced vibration of cables in cable-stayed bridges and its mitigation.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93 (2005) 79-95.

LIMAS, L. F. **Determinação das características aerodinâmicas de seções transversais de pontes em túnel de vento.** Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. 150p.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. **Wind Effects on Structures.** 3a ed. USA: A Wiley-Interscience Publication, 1996. 450p.

VIRLOGEUX, M. **Recent evolution of cable-stayed bridges.** Engineering of Structures 21(1999) 737-755.