

Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

Vibrações Induzidas por Vento em Cabos de Pontes Estaiadas e Suspensas

Lucas Canizza

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
lucas.canizza@aluno.ifsp.edu.br

Raniely da Silva Leite Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
raniely.c@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

Este artigo analisa as vibrações induzidas pelo vento em cabos de pontes estaiadas e suspensas, com ênfase nos fenômenos de galopamento e desprendimento de vórtices (vortex shedding). O estudo foi desenvolvido por meio de revisão bibliográfica, contemplando contribuições de diferentes autores, bem como o caso histórico da Ponte Tacoma Narrows. São abordados os fundamentos teóricos da interação fluido-estrutura, a analogia com cilindros circulares e as principais formas de instabilidade aeroelástica. Além disso, discutem-se medidas mitigatórias, como modificações geométricas nos cabos, dispositivos aerodinâmicos e amortecedores mecânicos. Conclui-se que a combinação de soluções aerodinâmicas e estruturais é essencial para reduzir oscilações, aumentar a durabilidade e garantir a segurança de pontes modernas.

Palavras-chave

Vibrações induzidas pelo vento; Galopamento; Desprendimento de vórtices; Pontes estaiadas; Amortecedores.

Abstract

This article analyzes wind-induced vibrations in stay cables and suspension bridge cables, with emphasis on the phenomena of galloping and vortex shedding. The study was conducted through a literature review, encompassing contributions from different authors as well as the historical case of the Tacoma Narrows Bridge. The theoretical foundations of fluid-structure interaction, the analogy with circular cylinders, and the main forms of aeroelastic instability are addressed. In addition, mitigation measures are discussed, such as geometric modifications of the cables, aerodynamic devices, and mechanical

dampers. It is concluded that the combination of aerodynamic and structural solutions is essential to reduce oscillations, increase durability, and ensure the safety of modern bridges.

Keywords: Wind-induced vibrations; Galloping; Vortex shedding; Cable-stayed bridges; Dampers.

1 – Introdução

O avanço tecnológico no século XX possibilitou a construção de pontes de vãos cada vez maiores, caracterizadas por estruturas esbeltas e pelo emprego de soluções inovadoras em cabos de suspensão e estais. Além de atenderem à demanda crescente por mobilidade urbana e interurbana, essas obras tornaram-se marcos arquitetônicos de grande relevância em diversas cidades e países. Contudo, o aumento da esbeltez estrutural também as tornou mais suscetíveis às ações ambientais, em especial aquelas provocadas pelo vento.

As vibrações induzidas pelo vento em cabos de pontes estaiadas e suspensas constituem um problema recorrente e têm motivado intensas pesquisas ao longo das últimas décadas. Um caso emblemático é o da ponte Tacoma Narrows, colapsada em 1940 nos Estados Unidos. Embora suas causas estejam relacionadas também à aeroelasticidade do tabuleiro, esse episódio é frequentemente citado como exemplo do impacto catastrófico da ação do vento sobre estruturas esbeltas e como marco para o desenvolvimento dos estudos de interação fluido-estrutura.

Nos cabos, fenômenos como o desprendimento de vórtices (*vortex shedding*) e o galopamento podem induzir oscilações persistentes, agravadas pela baixa taxa de amortecimento estrutural típica desses elementos. Caso não sejam previstos e tratados na fase de projeto, esses fenômenos podem comprometer a durabilidade dos cabos, gerar desconforto aos usuários e, em situações extremas, levar a falhas estruturais localizadas. Assim, compreender os mecanismos aeroelásticos torna-se essencial para projetistas e pesquisadores, permitindo o desenvolvimento de sistemas de amortecimento mais eficazes, a adoção de materiais com propriedades aerodinâmicas otimizadas e o aperfeiçoamento de estratégias construtivas.

Dessa forma, o estudo da interação entre vento e cabos é fundamental para a engenharia civil contemporânea, pois contribui para a prevenção de falhas, a otimização do desempenho estrutural e o aumento da vida útil das pontes. O presente artigo busca reunir conceitos teóricos, resultados de pesquisas e exemplos práticos, com foco nos fenômenos de *vortex shedding* e galopamento, a fim de analisar o estado da arte sobre os efeitos aerodinâmicos em cabos de pontes estaiadas e suspensas. Para tanto, o trabalho está organizado em cinco seções: a presente introdução; a fundamentação teórica, que discute os conceitos básicos; a metodologia, que descreve a abordagem adotada; os resultados e discussões, que

apresentam os principais achados da revisão; e, por fim, a conclusão, que sintetiza as considerações finais.



Figura 1 – Ponte estaiada Millau Viaduct, França. *Fonte: Adaptado de acervo digital, 2025.*

Na Figura 1 apresenta-se um exemplo de ponte estaiada, na qual a sustentação do tabuleiro é feita por cabos ancorados diretamente nos pilares principais.



Figura 2 – Ponte suspensa Akashi-Kaikyō, Japão. *Fonte: Adaptado de acervo digital, 2025.*

A Figura 2 ilustra uma ponte suspensa, caracterizada pelo uso de cabos principais ancorados em torres e estais secundários, sendo considerada uma das maiores do mundo em vão central.

2 - Objetivos e Fundamentação Teórica

2.1 - Objetivo Geral

Analisar os efeitos das vibrações induzidas por vento em cabos de pontes suspensas e estaiadas, destacando os mecanismos de galopamento e desprendimento de vórtices, bem como as medidas mitigatórias propostas na literatura.

2.2 - Objetivos Específicos

Revisar os principais conceitos de aerodinâmica relacionados a cabos.

Descrever os mecanismos de vibração mais relevantes.

Apresentar exemplos de pontes em que esses fenômenos foram observados.

Indicar recomendações de projeto e soluções para mitigação.

2.3 - Fundamentação Teórica

2.3.1 - Aerodinâmica de cabos

A análise aerodinâmica de cabos é geralmente conduzida por analogia com o comportamento de cilindros circulares longos imersos em escoamentos de ar. Os parâmetros mais utilizados para caracterização são:

Número de Reynolds (Re): indica a razão entre forças de inércia e viscosidade. Determina o regime do escoamento (laminar, transição ou turbulento).

Número de Strouhal (St): relaciona a frequência de desprendimento de vórtices com a velocidade do vento e o diâmetro do cabo.

Número de Scruton (Sc): avalia a suscetibilidade estrutural a vibrações, considerando a relação massa-amortecimento do cabo.

A baixa capacidade intrínseca de amortecimento dos cabos (ξ entre 0,001 e 0,005) torna esses elementos especialmente propensos a ressonâncias.

2.3.2 - Aerodinâmica de Cilindros Circulares

Na literatura, é comum a analogia entre o comportamento aerodinâmico dos cabos de pontes e o de cilindros circulares. Quando um fluido escoa sobre um corpo imerso, forma-se uma fina camada próxima à sua superfície, denominada camada limite, devido à influência da viscosidade. Esse conceito foi introduzido por Prandtl em 1904 e tornou-se fundamental para o estudo da dinâmica dos escoamentos.

À medida que o escoamento se desenvolve, a camada limite pode se separar da superfície do corpo, formando regiões de recirculação conhecidas como esteira de vórtices. Dentro dessa região,

surgem pressões negativas que contribuem para o aumento do coeficiente de arrasto. Ao mesmo tempo, forças laterais de sustentação aparecem devido ao desprendimento periódico de vórtices, fenômeno característico do *vortex shedding*, (Machado, 2008); (Blessmann, 2011).

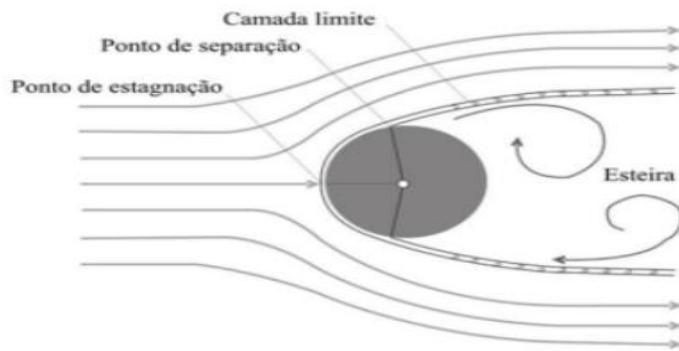


Figura 3 – Escoamento em torno de um cilindro circular. *Fonte: Adaptado de Machado, 2008.*

No ponto de estagnação, localizado na face frontal do cilindro, a velocidade do escoamento é praticamente nula, e a pressão atinge seu valor máximo. A partir desse ponto, o fluido se divide em duas correntes que percorrem o cilindro em sentidos opostos. Quando o número de Reynolds ultrapassa determinados limites, ocorre a separação da camada limite, formando vórtices alternados que se desprendem e geram a chamada esteira de Von Kármán.

(Blessmann, 2011) destaca que as forças na direção do vento são relativamente pequenas em comparação com as forças transversais, estas sim mais críticas para a indução de vibrações em cabos de pontes estaiadas e suspensas. Dessa forma, o estudo do escoamento em torno de cilindros circulares constitui a base para a compreensão dos mecanismos de instabilidade aeroelástica observados em cabos estruturais.

2.4 - Desprendimento de Vórtices (*vortex shedding*)

Quando o vento incide sobre um cilindro circular, o escoamento separa-se alternadamente em suas faces, formando fileiras de vórtices de Von Kármán. Esse fenômeno gera forças transversais periódicas, cuja frequência pode coincidir com a frequência natural do cabo.

A condição crítica ocorre quando:

$$V_{cr} = \frac{f_n \cdot D}{St} \quad (1)$$

em que: f_n é a frequência natural do cabo, D o diâmetro, St o número de Strouhal ($\approx 0,2$ para cilindros circulares).

Quando essa coincidência acontece, observa-se o fenômeno de *lock-in*, caracterizado pela sincronização da frequência de desprendimento com a do cabo, levando a oscilações de grande amplitude.

2.4.1 - Desprendimento de Vórtices em Seção Cilíndrica

O desprendimento de vórtices é um dos fenômenos mais relevantes no estudo da interação vento-estrutura em cabos de pontes estaiadas e suspensas. Quando o escoamento de ar incide sobre um cilindro circular, forma-se uma região de separação da camada limite em suas laterais, originando vórtices alternados que se desprendem de forma periódica, caracterizando a chamada esteira de Von Kármán.

Esse fenômeno ocorre dentro de faixas específicas do número de Reynolds (Re), que depende da relação entre a velocidade do vento, o diâmetro do cabo e a viscosidade do ar. Conforme ilustrado na Figura 6, é possível identificar diferentes regimes de escoamento:

Regime subcrítico: caracterizado pela presença de vórtices bem definidos e desprendimentos periódicos.

Regime crítico: ocorre uma brusca redução no coeficiente de arrasto (C_a), associada ao surgimento de bolhas de recirculação em apenas um dos lados do cilindro.

Regime supercrítico: há restabelecimento parcial do desprendimento de vórtices, porém de forma mais irregular.

Regime ultracrítico: os vórtices voltam a se formar em ambos os lados, mas com características distintas das observadas no regime subcrítico, Machado, 2008.

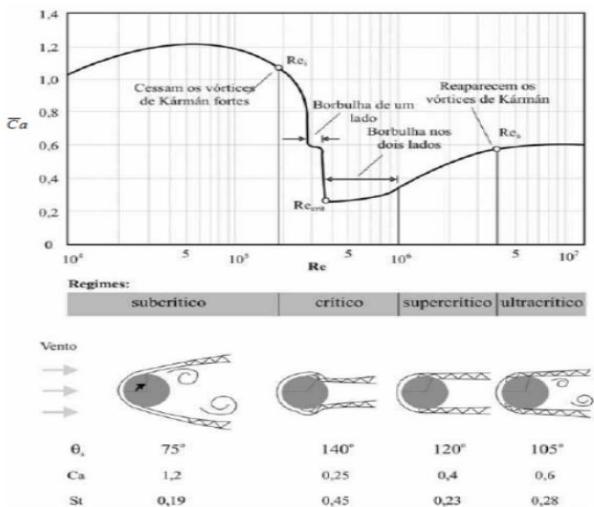


Figura 4 – Regimes característicos do fluxo em torno de cilindros (valores de Re ilustrativos).

Fonte: Machado, 2008.

A Figura 4 apresenta os regimes característicos do fluxo em torno de cilindros, destacando a variação do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds. Observa-se que no regime subcrítico predominam vórtices bem definidos, enquanto no regime crítico há a formação de bolhas de recirculação. Já nos regimes supercrítico e ultracrítico, os vórtices voltam a se formar, porém de maneira diferenciada, o que influencia diretamente no comportamento dinâmico dos cabos.

A frequência do desprendimento de vórtices está diretamente associada ao número de Strouhal (St), definido pela equação:

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

em que: f é a frequência de desprendimento, D o diâmetro do cilindro, V a velocidade do vento.

Para cilindros circulares, o valor típico de St é aproximadamente 0,2, indicando que a frequência de vórtices está diretamente relacionada ao diâmetro do cabo e à velocidade do escoamento (Blessmann, 2011).

Quando a frequência natural de vibração do cabo coincide com a frequência de desprendimento de vórtices, ocorre o fenômeno de ressonância por lock-in, capaz de induzir deslocamentos significativos e acelerar processos de fadiga estrutural.

Além disso, o desprendimento de vórtices pode ser influenciado por fatores externos, como rugosidade superficial, presença de chuva e variações na inclinação do cabo em relação ao vento incidente. Tais condições podem intensificar o fenômeno ou alterar sua faixa de ocorrência, tornando-o ainda mais crítico em situações reais de projeto.

2.5 - Galopamento

O galopamento ocorre em estruturas leves e flexíveis, quando a interação aerodinâmica resulta em amortecimento negativo. Sua característica principal é o surgimento de vibrações de baixa frequência, alta amplitude e comportamento instável.

O critério de Den Hartog estabelece que ocorre instabilidade quando:

$$\left(\frac{dC_s}{d\beta} + C_a \right)_{\beta=0} < 0 \quad (3)$$

onde: C_s é o coeficiente de sustentação e C_a o coeficiente de arrasto.

Esse fenômeno é mais comum em cabos inclinados ou em seções modificadas, que perdem a simetria aerodinâmica.

2.6 - Outros Mecanismos de Vibração

Além dos fenômenos principais, destacam-se:

Martelamento (buffeting): excitação aleatória devida a rajadas de vento ou turbulência.

Chuva e vento: instabilidade induzida pela formação de filetes de água nos cabos, que alteram a distribuição de pressão.

Interação entre cabos: vibrações por esteira ou por interferência em grupos de estais.

3 - Metodologia

Este trabalho de pesquisa adota uma metodologia qualitativa, fundamentada em revisão bibliográfica, com foco na análise e síntese de informações provenientes de estudos acadêmicos e técnicos. A pesquisa não envolve experimentação direta em túnel de vento ou coleta de dados em campo, mas baseia-se na compilação de artigos científicos, dissertações, trabalhos de conclusão de curso e normas técnicas já publicadas, a fim de construir uma fundamentação sólida sobre o tema. O método adotado pode ser descrito em quatro etapas principais:

3.1 - Revisão Bibliográfica

Foi realizada uma busca sistemática em bases de dados científicas nacionais e internacionais, bem como em publicações especializadas em engenharia civil e mecânica dos fluidos. Os principais documentos consultados incluem: (Machado, 2008), com foco no efeito do vento em cabos de pontes suspensas; (Carvalho, 2017), que aborda os efeitos aerodinâmicos em cabos de pontes estaiadas; além das referências internacionais como (Caetano, 2007), (Xu, 2013) e (Gimsing & Georgakis, 2012).

Esses trabalhos fornecem subsídios teóricos e práticos sobre os fenômenos de galopamento e vortex shedding, além de estudos normativos (Post-Tensioning Institute, 2008) frequentemente empregados em projetos de pontes estaiadas.

3.2 - Análise Teórica dos Fenômenos

A partir da literatura, foram examinados os conceitos físicos e matemáticos que regem os fenômenos de desprendimento de vórtices e galopamento em cabos. Foram analisadas as condições críticas para o surgimento dessas instabilidades, destacando parâmetros como número de Strouhal, número de Reynolds e número de Scruton. As equações apresentadas pela literatura foram discutidas

para relacionar a frequência natural dos cabos e a velocidade crítica do vento, de modo a compreender os riscos de ressonância e instabilidade.

3.3 - Estudo de Casos

Casos históricos e contemporâneos de pontes foram estudados, como a Tacoma Narrows Bridge (1940), cujo colapso é um marco na análise de fenômenos aeroelásticos, e as ocorrências de vibração excessiva em pontes como Storebaelt (Dinamarca) e Normandie (França). Essa etapa permitiu contextualizar a importância da análise aerodinâmica, mostrando que falhas na previsão desses efeitos podem ter consequências graves, como deslocamentos excessivos, danos estruturais e redução da vida útil da obra.

3.4 - Identificação de Soluções Mitigadoras

A última etapa metodológica consistiu na identificação e descrição das principais estratégias de mitigação para reduzir os efeitos das vibrações induzidas por vento. Foram levantadas técnicas como:

Modificações aerodinâmicas, a exemplo de luvas helicoidais, superfícies rugosas ou seções não circulares para cabos.

Dispositivos mecânicos, como amortecedores viscoelásticos e hidráulicos instalados junto às ancoragens.

Medidas estruturais, como o uso de *cross-ties* (cabo transversal) para aumento da rigidez do conjunto.

4 - Resultados e Discussões

4.1 - Casos Reais Documentados

Diversas pontes ao redor do mundo apresentaram episódios significativos de vibrações em seus cabos, evidenciando a complexidade da interação entre vento e estrutura. Na ponte Storebaelt (Dinamarca), por exemplo, foram observados deslocamentos de até 2 m nos cabos, associados à combinação de vento e chuva. Já na ponte Normandie (França), registraram-se deslocamentos de até 1 m, provocados pelo desprendimento de vórtices. Por sua vez, a ponte de Shanghai (China) apresentou oscilações tão intensas que ocasionaram rupturas nos dutos plásticos de proteção dos cabos.

4.1.1 - Caso Histórico: Ponte Tacoma Narrows

A Ponte Tacoma Narrows, inaugurada em julho de 1940 no estado de Washington (EUA), era considerada, à época, uma das maiores pontes suspensas do mundo, com um vão central de

aproximadamente 853 metros. Seu tabuleiro, projetado de forma extremamente esbelta, apresentava desde os primeiros dias de operação oscilações visíveis mesmo sob ventos de baixa intensidade, o que lhe conferiu o apelido popular de *Galloping Gertie*.

Em 7 de novembro do mesmo ano, sob ventos moderados de cerca de 65 km/h, a estrutura entrou em ressonância aeroelástica, resultando em torções e vibrações excessivas. O tabuleiro não resistiu às deformações acumuladas e colapsou poucos meses após sua inauguração, em um episódio amplamente documentado.

O desastre evidenciou de forma marcante a importância da análise aeroelástica em estruturas de grande porte. Embora o colapso tenha estado relacionado principalmente ao fenômeno de flutter aeroelástico do tabuleiro, o caso serviu como ponto de partida para o avanço das pesquisas sobre a interação fluido-estrutura.

Desde então, tornou-se referência obrigatória na literatura técnica e contribuiu para o desenvolvimento de métodos de dimensionamento que consideram, além da resistência estrutural, os efeitos dinâmicos do vento sobre cabos e outros elementos.

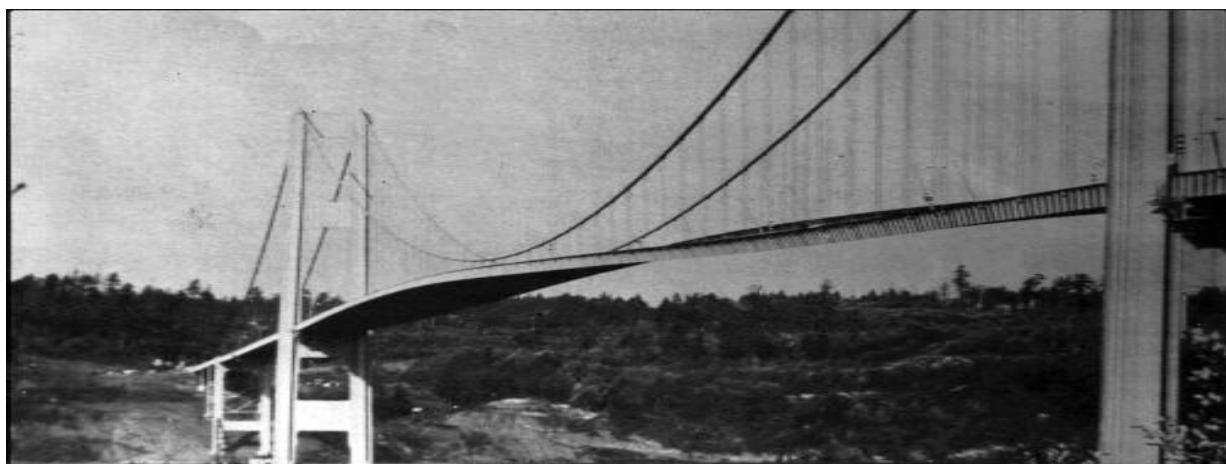


Figura 5 – Oscilações aero elásticas na Ponte Tacoma Narrows antes do colapso (1940).

Fonte: Arquivo histórico digital, 2025.

A Figura 5 mostra as oscilações aero elásticas progressivas observadas na Ponte Tacoma Narrows, fenômeno que antecedeu o colapso da estrutura. Esse comportamento, amplamente documentado em registros fotográficos e vídeos, tornou-se referência para o estudo das vibrações induzidas pelo vento.

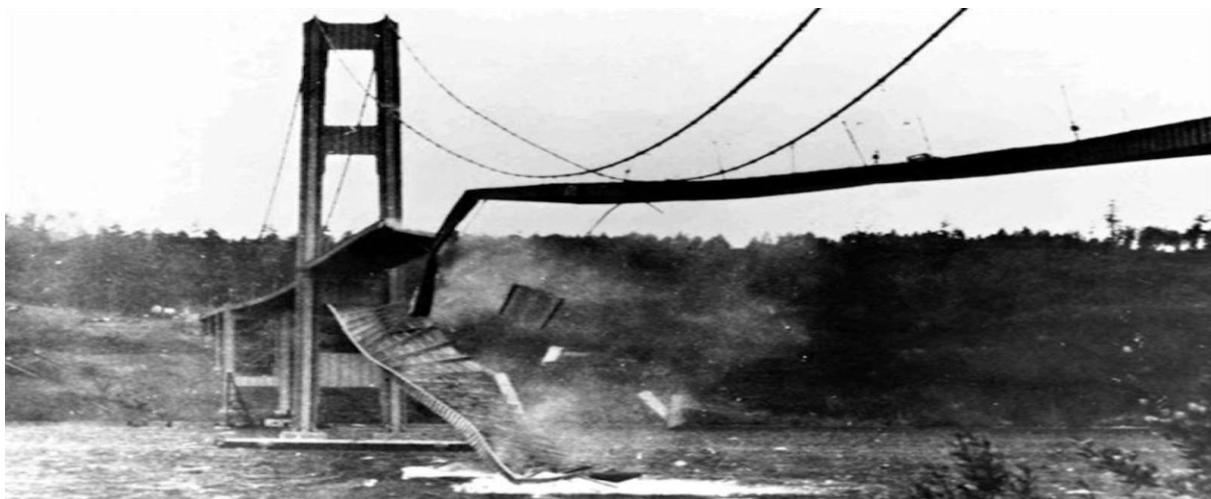


Figura 6 – Colapso da Ponte Tacoma Narrows em 7 de novembro de 1940.

Fonte: Arquivo histórico digital, 2025.

A Figura 6 ilustra o momento do colapso da ponte Tacoma Narrows, em novembro de 1940. O caso evidenciou a vulnerabilidade das estruturas esbeltas à ação do vento e marcou o início das pesquisas sistemáticas sobre a aeroelasticidade em engenharia civil.

4.2 - Comparação entre os Fenômenos

Vortex shedding: vibrações frequentes e de menor amplitude, mas que podem gerar fadiga estrutural ao longo do tempo.

Galopamento: instabilidade mais violenta, capaz de gerar amplitudes elevadas em curto período, com potencial de causar falhas catastróficas.

Chuva e vento: fenômeno recorrente em cabos inclinados, responsável por grande parte dos casos documentados.

4.3 - Medidas Mitigatórias

O controle das vibrações induzidas pelo vento é fundamental para a durabilidade estrutural e a segurança de pontes suspensas e estaiadas. Entre as principais soluções estudadas destacam-se:

4.3.1 - Luvas Perfuradas

As luvas perfuradas fragmentam o escoamento em torno do cabo, produzindo um grande número de pequenos vórtices que impedem a formação de desprendimentos organizados de maior escala. Esse efeito é análogo ao produzido pela turbulência atmosférica. Estudos apontam que perfurações quadradas

com índices de vazios entre 20% e 36% e uma separação entre a luva e o cabo da ordem de 12% do diâmetro apresentam os melhores resultados [Machado, 2008].

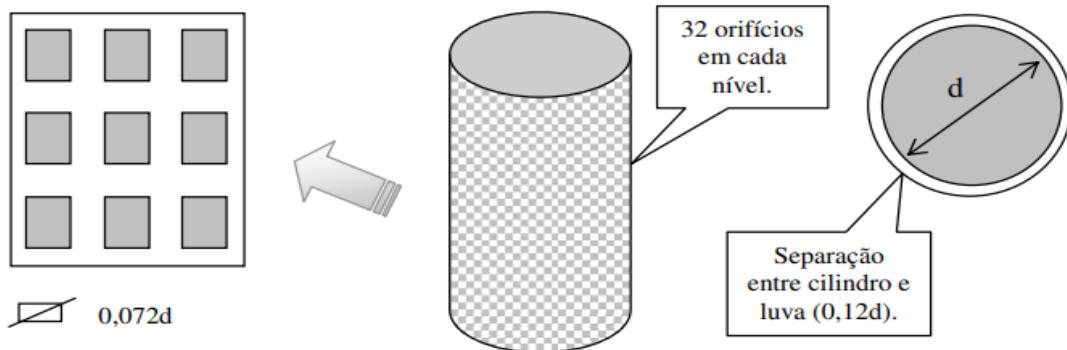


Figura 7 – Luvas perfuradas: perspectiva, corte e detalhe dos orifícios. *Fonte: Machado (2008).*

Na Figura 7 observa-se como as perfurações nas luvas permitem a passagem parcial do escoamento, fragmentando os vórtices maiores em estruturas menores. Esse mecanismo reduz a intensidade das forças transversais que atuam sobre os cabos.

4.3.2 - Luvas de Lâminas Longitudinais

As luvas com lâminas longitudinais consistem em elementos aplicados ao longo do cabo, que interferem no escoamento, dificultando a formação de vórtices coerentes e reduzindo o risco de *lock-in*. A ação desses dispositivos baseia-se na criação de múltiplas linhas de separação do escoamento, fragmentando o desprendimento e reduzindo sua intensidade.

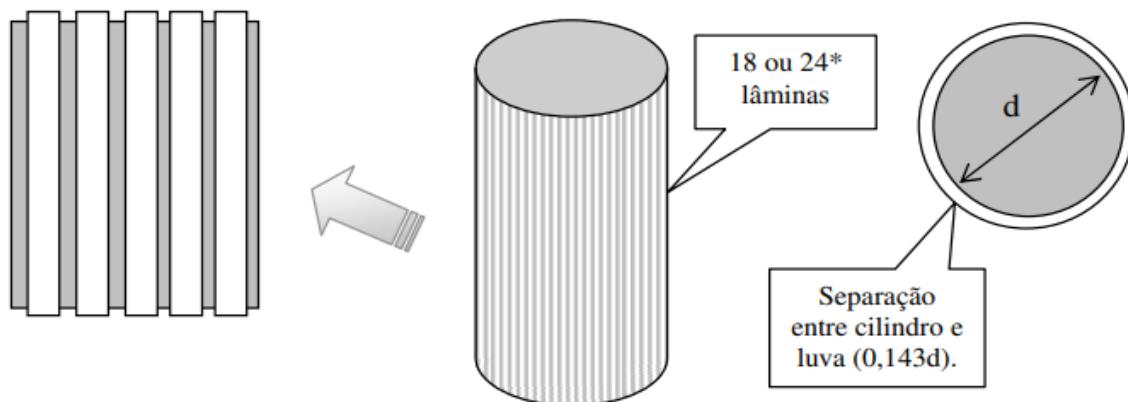


Figura 8 – Luvas com lâminas longitudinais aplicadas em cabos. *Fonte: Machado, 2008.*

A Figura 8 ilustra a disposição longitudinal das lâminas, que funcionam como elementos de perturbação do escoamento, inibindo a formação de esteiras coerentes e reduzindo o risco de ressonância.

4.3.3 - Lâminas Helicoidalmente Dispostas

Conhecidas como filetes helicoidais, são amplamente utilizadas em pontes na Europa e América. Sua eficácia está na modificação do caminho do escoamento ao longo do cabo, evitando a formação de filetes de água contínuos (responsáveis pelo fenômeno de chuva e vento) e, ao mesmo tempo, desestabilizando a formação da esteira de Von Kármán, (Carvalho, 2017).

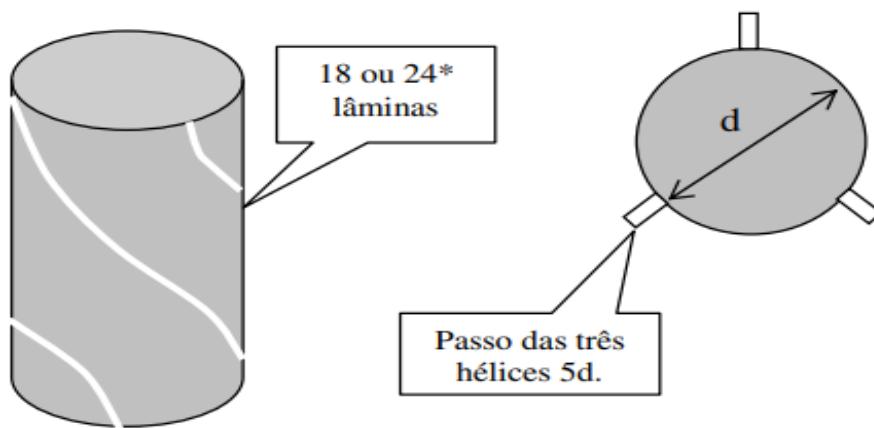


Figura 9 – Modificação na seção transversal do cabo com filetes helicoidais. *Fonte: Machado, 2008.*

A Figura 9 mostra o filete helicoidal ao longo do cabo, responsável por interromper a formação de filetes de água contínuos e alterar o padrão de desprendimento de vórtices, tornando-o mais instável e de menor intensidade.

4.3.4 - Eficiência das Medidas

Segundo (Caetano, 2007), aproximadamente 95% das vibrações relatadas em cabos de pontes estaiadas estão associadas ao fenômeno de chuva e vento, o que reforça a relevância de medidas aerodinâmicas na fase de projeto. Os dispositivos descritos apresentam boa eficácia quando aplicados de forma combinada, podendo reduzir significativamente a amplitude das oscilações.

Além das soluções aerodinâmicas, a literatura também recomenda o uso de amortecedores mecânicos (viscoelásticos ou hidráulicos) e de ligações cruzadas (*cross-ties*) para reforçar a estabilidade estrutural do conjunto (Machado, 2008).

5 - Resultados dos Testes

A revisão bibliográfica evidencia que os fenômenos de desprendimento de vórtices e galopamento representam os principais riscos em cabos de pontes suspensas e estaiadas.

O desprendimento de vórtices está associado à formação alternada de vórtices de von Kármán, cuja frequência pode coincidir com a frequência natural do cabo, gerando o fenômeno de lock-in. Embora apresente amplitudes menores, a recorrência pode levar à fadiga do material.

O galopamento, por outro lado, é uma vibração autoexcitada e responsável por cerca de 95% dos casos de instabilidade. Caracteriza-se por amplitudes elevadas e baixa frequência, podendo levar ao colapso em curto prazo.

As ações mitigatórias propostas pela literatura incluem dispositivos aerodinâmicos (helicoidais, perfurados e longitudinais), instalação de amortecedores e aumento do amortecimento estrutural. Além disso, recomenda-se que a análise do escoamento e do comportamento dinâmico dos cabos seja incorporada ainda na fase de projeto, em conformidade com normas internacionais, como as do Post-Tensioning Institute.

6 - Considerações Finais

A análise realizada evidencia que os impactos das vibrações induzidas pelo vento em cabos de pontes estaiadas e suspensas não se limitam apenas ao campo teórico, mas possuem implicações diretas na prática de projeto e manutenção dessas estruturas. Nesse sentido, torna-se imprescindível que os engenheiros incorporem, de forma sistemática, estudos aeroelásticos nas etapas preliminares de concepção, utilizando-se de normas técnicas atualizadas e de ferramentas numéricas e experimentais avançadas. Além disso, a experiência adquirida em casos documentados internacionalmente reforça a necessidade de monitoramento contínuo das pontes em operação, garantindo a detecção precoce de problemas e a aplicação imediata de medidas corretivas. Por fim, destaca-se que a constante evolução tecnológica, aliada ao desenvolvimento de materiais e dispositivos mais eficientes, deve orientar a busca por soluções cada vez mais seguras e sustentáveis, assegurando não apenas a longevidade das obras, mas também a confiança da sociedade na infraestrutura construída.

7 - Conclusão

A análise das vibrações induzidas pelo vento em cabos de pontes estaiadas e suspensas evidencia a complexidade dos fenômenos aeroelásticos e a relevância de sua consideração desde as etapas iniciais de projeto. Os estudos revisados demonstram que tanto o desprendimento de vórtices quanto o galopamento representam riscos significativos, ainda que de naturezas distintas: enquanto o vortex

shedding tende a gerar vibrações frequentes de menor amplitude, capazes de comprometer a durabilidade estrutural por fadiga, o galopamento se apresenta como um fenômeno mais severo, caracterizado por grandes amplitudes em curto intervalo de tempo, com potencial para causar falhas críticas.

Casos documentados em diferentes pontes ao redor do mundo reforçam a importância de estratégias mitigatórias eficazes, que vão desde modificações aerodinâmicas até o uso de amortecedores e soluções estruturais adicionais. Nesse contexto, a aplicação de dispositivos dissipadores de energia, a adoção de seções transversais otimizadas e a análise criteriosa em fase de concepção tornam-se medidas essenciais para assegurar a integridade e a longevidade dessas obras de infraestrutura.

Portanto, pode-se concluir que o enfrentamento das vibrações induzidas pelo vento requer não apenas o aprofundamento contínuo da pesquisa científica, mas também a integração entre conhecimento teórico, avanços tecnológicos e práticas de engenharia. Dessa forma, é possível garantir maior segurança, desempenho estrutural otimizado e aumento da vida útil das pontes estaiadas e suspensas, consolidando-as como soluções viáveis e resilientes para os desafios da mobilidade contemporânea.

8 – Bibliografia

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

CAETANO, E. **Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridges**. *Structural Engineering International*, v. 17, n. 3, p. 207–212, 2007.

CARVALHO, R. A. **Efeitos aerodinâmicos em cabos de pontes estaiadas**. Belo Horizonte: UFMG, 2017.

DE CONCRETO ARMADO E AÇO, Curso D. E. Especialização E. M. Análise E. Dimensionamento D. E. Estruturas. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS ESCOLA DE ENGENHARIA. Disponível em: <<https://share.google/sAhkdw8NuU1KYxf4W>>. Acesso em: 24 set. 2025.

DE SOUZA MACHADO, Daniel. SOBRE EFEITO DO VENTO EM CABOS DE PONTES SUSPENSAS. Disponível em: <<https://share.google/2d6s5hgReGlR2cJjX>>. Acesso em: 24 set. 2025.

Establishing a secure connection. Disponível em: <<https://share.google/eSonVBN1eaq1vAj6p>>. Acesso em: 24 set. 2025

GIMSING, N. J.; GEORGAKIS, C. T. **Cable Supported Bridges: Concept and Design**. 3. ed. Chichester: Wiley, 2012.

MACHADO, D. de S. **Sobre efeito do vento em cabos de pontes suspensas**. Porto Alegre: UFRGS, 2008.

XU, Y. L. **Wind Effects on Cable-Supported Bridges**. Hoboken: Wiley, 2013.