

# UMA REVISÃO DOS FENÔMENOS AERODINÂMICOS RELACIONADOS AO COLAPSO DA PONTE TACOMA

A REVIEW OF AERODYNAMIC PHENOMENA RELATED TO TACOMA BRIDGE COLLAPSE

Matheus Borges Seidel<sup>1</sup>, Geraldo José Belmonte dos Santos<sup>2</sup>

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v41p177-189.2022

## RESUMO

A Engenharia Estrutural se desenvolveu baseada na ciência, tecnologia e experiências acumuladas de construções passadas. Nesse sentido, os erros e acertos anteriores são importantes casos de aprendizagem e evolução dos procedimentos, desde que as avaliações sejam realizadas corretamente. Um caso de insucesso na Engenharia Estrutural muito conhecido, citado e estudado, é o colapso da ponte Tacoma Narrows, em 1940, nos Estados Unidos, que se tornou um marco histórico, sendo bastante conhecido até por profissionais e estudantes de áreas correlatas. A dramaticidade do evento e sua captação em vídeo ajudaram a popularizar a ruína da estrutura, que acabou sendo alvo de explicações, no mínimo, insuficientes e, majoritariamente, equivocadas. Tipicamente, o caso da ponte Tacoma tem sido apresentado em diversos livros de Física básica como um exemplo do fenômeno de ressonância e suas consequências catastróficas. Este trabalho apresenta alguns desses relatos e tem o objetivo de esclarecer que ressonância devido à ação do vento não foi a causa do colapso da estrutura. Explicações mais acuradas com base nos conhecimentos atuais em Engenharia do Vento são apresentadas, mostrando que a causa do colapso da ponte foi um flutter torsional autoinduzido, de um grau de liberdade, associado à geometria da seção transversal da ponte de perfil não aerodinâmico, que conduziu a um amortecimento negativo e consequente amplificação da resposta estrutural.

**Palavras-chave:** Ponte Tacoma Narrows; colapso; ressonância; livros de Física.

## ABSTRACT

Structural engineering developed based on science, technology and accumulated experiences from past constructions. In this sense, previous mistakes and successes are important cases of learning and evolution of procedures, as long as the assessments are carried out correctly. A well-known, cited and studied case of failure in structural engineering is the collapse of the Tacoma Narrows Bridge in 1940 in the United States, which became a historical landmark, being well known even by professionals and students in related fields. The dramatic character of the event and its capture on video helped to popularize the ruin of the structure, which ended up being the target of explanations, at least insufficient and, for the most part, wrong. Typically, the case of the Tacoma bridge has been presented in several basic physics textbooks as an example of the resonance phenomenon and its catastrophic consequences. This work presents some of these reports and aims to clarify that resonance due to wind action was not the cause of the structure's collapse. More accurate explanations based on current knowledge in Wind Engineering are presented, showing that the cause of the bridge collapse was a self-induced torsional flutter, of one degree of freedom, associated with the non-aerodynamic cross section geometry of the bridge, which led to negative damping and consequent amplification of the structural response.

**Keywords:** Tacoma Narrows Bridge; collapse; resonance; Physics textbooks.

<sup>1</sup> Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro; matheus.seidel@coc.ufrj.br

<sup>2</sup> Professor, Doutor em Modelagem Computacional, Universidade Estadual de Feira de Santana; belmonte@uefs.br

## INTRODUÇÃO

A célebre ponte pênsil Tacoma Narrows foi construída entre 23 de novembro de 1938 e 1 de julho de 1940 na cidade homônima de Tacoma, no estado de Washington, EUA (Figura 1). Pouco mais de quatro meses após sua inauguração, no dia 7 de novembro de 1940, a ponte sofreu grandes oscilações que levaram ao seu colapso global, evento amplamente registrado por vídeos, fotografias e pela imprensa local da época. Apesar de sua vida curta, a ponte Tacoma se tornou, pelos motivos errados, uma referência na Engenharia de Estruturas e, como será mostrado a seguir, um exemplo muito presente (de forma majoritariamente equivocada) nos livros de Física básica de como o fenômeno da ressonância pode ter efeitos catastróficos em estruturas.

**Figura 1 – Inauguração da ponte Tacoma**



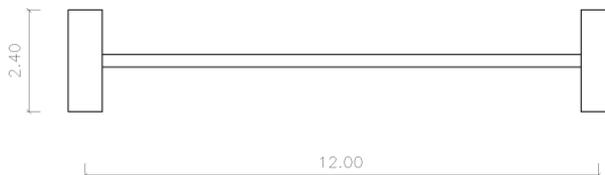
Fonte: Unknown, 1940.

A ponte original possuía um tabuleiro para duas faixas de tráfego, com 12 m de largura, que era sustentado por cabos ligados a dois grandes pilares. O comprimento total da ponte media 1.500 m, com 840 m no vão central entre os pilares, que, à época, correspondia ao terceiro maior vão livre do mundo em pontes suspensas.

Em razão da esbelteza da ponte, o projeto original previa uma treliça suspensa, porém, devido ao alto custo dessa opção e à escassez de recursos em um período posterior à grande depressão, optou-se por enrijecer o tabuleiro através de duas vigas laterais com 2,4 m de

altura (MILLER, 1963), conforme a Figura 2. Conforme será mostrado neste texto, esse foi um dos principais fatores que contribuiu para o colapso da estrutura.

**Figura 2 – Desenho simplificado da seção transversal da ponte Tacoma (dimensões em metros)**



Fonte: acervo dos autores.

Desde a sua construção, a ponte já apresentava oscilações verticais de grande amplitude que lhe renderam o apelido de *Galloping Gertie* entre os operários da construção. O movimento transversal em forma ondulada já impressionava e exigiu medidas corretivas, como instalação de amortecedores hidráulicos e tirantes diagonais entre as vigas laterais e os cabos do vão principal, mas que se mostraram ineficazes (FULLER; ZOLLMANN; CAMPBELL, 1979).

Ainda antes do colapso, o famoso engenheiro e físico Theodore von Kármán havia sido chamado para analisar o comportamento aerodinâmico da ponte, entretanto, não houve tempo suficiente para se desenvolver uma solução. Além de von Kármán, o professor F. B. Farquharson, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Washington, também estudava intervenções que pudessem minimizar as oscilações na ponte, mas também não obteve sucesso. Farquharson, inclusive, estava no local no dia do acidente e foi um dos responsáveis pelo registro videográfico do evento (IRWIN et al., 2015).

Durante o curto período de operação da estrutura, as oscilações assustavam motoristas, que chegavam a perder parcialmente de vista os carros a sua frente sob a crista da onda formada pelo tabuleiro da ponte. Felizmente, na ocasião do colapso, a estrutura havia sido interditada e não houve perda de vidas humanas (FULLER; ZOLLMANN; CAMPBELL, 1979).

Os estudos posteriores de investigação do acidente alavancaram as pesquisas em Engenharia do Vento (EV) e solidificaram esse campo do conhecimento como uma disciplina

especializada. A partir de então, a EV passou a se relacionar mais intensamente com as Ciências Aeronáuticas, já bastante desenvolvidas por ocasião da Primeira Guerra Mundial (OLIVEIRA, 2009). Atualmente, a EV constitui uma ciência bastante robusta e capaz de responder aos principais problemas aerodinâmicos da Engenharia de Estruturas e, inclusive, oferecer explicações satisfatórias ao icônico colapso da ponte Tacoma.

Apesar disso, as menções à ruína da ponte Tacoma permanecem, desde longa data, como um exemplo típico nos livros de Física básica com explicações, no mínimo, insuficientes e até mesmo, em muitos casos, incorretas.

A dramaticidade da ruptura (Figura 3) e o fato de ter sido o primeiro grande desastre estrutural claramente registrado em vídeo fizeram da ponte Tacoma um exemplo quase folclórico e relacionado quase que automática e irrefletidamente ao fenômeno de ressonância. Assim, o exemplo passou a ser replicado na literatura de Física básica sem muitos questionamentos e investigações mais aprofundadas, mesmo com as incertezas.

**Figura 3 – Momento da ruptura da ponte**



Fonte: Submerged Cultural Resources Exploration Team (1940).

Com o objetivo de esclarecer os fenômenos envolvidos no acidente histórico, este texto apresenta o registro da ponte Tacoma feito em livros de Física básica (Ensino Médio) publicados no Brasil e oferece uma explicação mais acurada das causas, particularidades e nuances dos eventos que se sucederam.

## O COLAPSO DA PONTE TACOMA NA ÓTICA DOS TEXTOS DE FÍSICA BÁSICA

O registro típico, nos livros de Física, do fenômeno causador da ruína da ponte Tacoma consiste em afirmar que a frequência de aplicação da força do vento se aproximou da frequência natural de vibração da estrutura, o que teria provocado a ressonância e, conseqüentemente, o colapso estrutural. A menção desse exemplo usualmente se encontra no volume referente ao 2º ano do Ensino Médio, no item de ressonância, dentro da seção sobre fenômenos ondulatórios.

A seguir são apresentadas citações de alguns destes livros:

Nos Estados Unidos, em julho 1940, a Ponte Tacoma, no Estado de Washington, rompeu-se ao entrar em ressonância com rajadas do vento que soprava periodicamente na região (FERRARO; SOARES, 1998, p. 462).

A ponte do rio Tacoma, nos Estados Unidos, ruiu em 1940, quando uma ventania lhe imprimiu impulsos periódicos com frequência igual a uma frequência natural de vibração da ponte [...] A destruição da ponte [...] é um bom exemplo de ressonância (RAMALHO; FERRARO; SOARES, 2012, p. 474).

Foi exatamente isso [ressonância] o que aconteceu, em 7 de novembro de 1940, com uma ponte situada sobre o estreito de Tacoma, nos Estados Unidos. Um vento forte oscilou com uma das frequências próprias da ponte e, vagarosamente, a amplitude de oscilação da ponte foi aumentando até ela se quebrar (CALÇADA; SAMPAIO, 2012, p. 384).

O episódio do acidente da ponte de Tacoma, nos Estados Unidos, é um bom exemplo para ilustrar os poderosos efeitos da ressonância (NANI et al., 2016, p. 177).

Um exemplo [de ressonância com fenômenos naturais] foi o que ocorreu em 1940, com a ponte pênsil que ligava as cidades de Tacoma e Seattle, nos Estados Unidos, que caiu em razão da ação do vento. Na verdade, o vento oscilou a ponte de forma que ela atingiu sua frequência de ressonância (MÁXIMO; ALVARENGA, 2013, p. 434).

Na citação de Máximo e Alvarenga (2013), inclusive, além de explicar incorretamente o fenômeno físico, o texto erra ao afirmar que a ponte ligava Tacoma e Seattle; a estrutura localizava-se na cidade de Tacoma, algumas dezenas de quilômetros ao sul de Seattle.

Em Yamamoto e Fuke (2016), sequer é oferecida uma explicação no corpo do texto, apenas é apresentada uma fotografia da ponte em colapso e a seguinte legenda: “Fotografia no momento da destruição (real) da ponte sobre o rio Tacoma, nos Estados Unidos em 1940, pela ressonância gerada por um vento” (YAMAMOTO; FUKE, 2016, p. 275).

Desconhecendo a complexidade dos fenômenos aerodinâmicos envolvidos, em alguns casos, dá-se ênfase, com uma inexplicável convicção, ao fenômeno da ressonância como o único motivo do desastre.

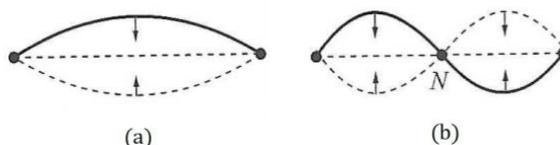
A famosa ponte pênsil de Tacoma [...] sucumbiu [...] ao entrar em ressonância com lufadas de vento que sopravam numa frequência específica, justamente uma das frequências naturais da ponte. Com isso, ela passou a oscilar com amplitudes cada vez maiores até seu colapso. O desastre ficou famoso e é sempre lembrado por ser um exemplo evidente do fenômeno ondulatório (BONJORDO et al., 2016, p. 238).

A ponte sobre o rio Tacoma (Washington, EUA) foi destruída em novembro de 1940, após sua estrutura entrar em ressonância com um forte vento, fazendo-a vibrar em modos longitudinais (ao longo de seu comprimento) e para os lados (BARRETO; SILVA, 2016, p. 252).

O trabalho de Barreto e Silva (2016), além de explicar o evento como resultado da ressonância, é específico ao afirmar o modo de vibração como sendo de flexão, no sentido longitudinal e para os lados. O fato é que, no dia do acidente, verificou-se vibração flexional transversal (deslocamentos verticais) e não foi possível verificar flexão lateral (justamente no eixo de maior inércia do tabuleiro). Mesmo assim, a vibração flexional vertical não ocorria no instante do acidente. Como afirmado anteriormente, oscilações verticais ocorriam desde o início da construção da estrutura e não comprometeram a integridade estrutural dos materiais. Nos minutos que precederam o colapso, o que se verificou foi a vibração

torsional, ocorrendo de forma alternada com um ou nenhum nó intermediário (Figura 4).

**Figura 4 – Modos de vibração torsional da ponte com (a) nenhum e (b) um nó intermediário**



Fonte: adaptado de Nussenzveig (2002).

Já em Guimarães, Piqueira e Carron (2016), a explicação do fenômeno é colocada como um questionamento ao estudante na seção de exercícios: “Com base na ressonância, explique: o desabamento da ponte Tacoma Narrows, nos Estados Unidos, em 1940” (GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, 2016, p. 150).

Na edição do livro com notas de auxílio ao professor, é dada a seguinte resposta: “Os vórtices da turbulência do vento produziram vibrações ressonantes com as vibrações da ponte” (GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, 2016, p. 150).

Entre os títulos pesquisados, Bôas, Doca e Biscuola (2012) foram os únicos que mencionaram alguma possibilidade de explicação diferente da tradicional referência à ressonância:

Na ressonância, um sistema mecânico pode ter o limite de elasticidade ultrapassado, o que pode provocar seu rompimento. Isso foi o que provavelmente aconteceu na famosa ponte Tacoma Narrows [...]. O vento pode ter causado a vibração da ponte, com amplitudes cada vez maiores, até que ela se rompeu. Há uma teoria de que o vento iniciou a oscilação, mas foram os cabos de sustentação – que ficaram tensos quando a ponte descia e frouxos quando subia – que amplificaram as vibrações até ocorrer o colapso final (BÔAS; DOCA; BISCUOLA, 2012, p. 235).

O comportamento dos cabos, de fato, influenciou na ruptura global da estrutura, conforme afirmado por Miller (1963), mas essa explicação ainda se mostra insuficiente à luz dos conhecimentos atuais da EV.

Como é possível verificar nas citações reproduzidas nesta seção, a menção ao colapso da ponte Tacoma como um exemplo de ressonância permanece muito presente nos

textos de Física básica usados também por estudantes de Engenharia. Infelizmente, essa explicação não corresponde aos fatos e às conclusões mais bem fundamentadas de alguns pesquisadores da área de EV.

As seções subsequentes apresentam explicações sobre os mecanismos físicos que levaram à ruptura da ponte. É importante notar, porém, que este trabalho, de forma alguma, possui a intenção de desacreditar as fontes citadas aqui, especialmente tendo em vista os diversos autores e editoras renomados que muito contribuíram para o ensino de ciências no Brasil. Não obstante, verifica-se a necessidade de oferecer explicações acessíveis e mais apropriadas para esse icônico acidente aos profissionais e estudantes de Ciências Físicas e Engenharias.

## RESSONÂNCIA E DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES

A definição do fenômeno oscilatório de ressonância é ponto pacífico na literatura e usualmente é apresentado corretamente nos livros de Física básica. Como exemplo, Nussenzveig (2002), em publicação de nível de graduação, explica-o da seguinte forma:

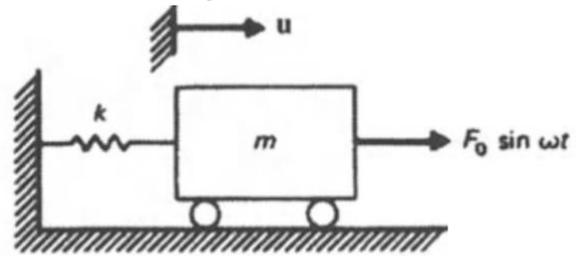
À medida que a frequência  $\omega$  da força externa [excitadora do sistema] se aproxima da frequência [natural]  $\omega_0$  das oscilações livres, a amplitude  $A$  da resposta vai crescendo, e  $A \rightarrow \infty$  para  $\omega \rightarrow \omega_0$ . O crescimento da resposta quando  $\omega$  se aproxima de  $\omega_0$  corresponde ao fenômeno da ressonância (NUSSENZVEIG, 2002, p. 80).

Conforme apresentado em Paz e Leigh (2004), um sistema não-amortecido (ver Figura 5) com um único grau de liberdade de deslocamento  $u(t)$ , submetido ao carregamento harmônico  $F(t) = F_0 \cdot \sin(\omega t)$ , sendo  $\omega$  a frequência da força excitadora, é dado por:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = F_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

em que  $\ddot{u}$  é aceleração do sistema,  $m$  é a massa e  $k$  é a rigidez.

**Figura 5 – Sistema massa-mola não-amortecido com um grau de liberdade**



Fonte: Paz e Leigh (2004).

A solução do sistema dado pela Equação (1) é:

$$u(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t) + B \cdot \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0/k}{1 - r^2} \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

em que a frequência natural de vibração do sistema é  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  e  $r = \omega/\omega_0$  é a razão de frequência.

Aplicando as condições iniciais de deslocamento e velocidade,  $u(t = 0) = u_0$  e  $\dot{u}(t = 0) = v_0$ , obtém-se:

$$u(t) = u_0 \cdot \cos(\omega_0 t) + \left(\frac{v_0}{\omega_0} - \frac{r \cdot F_0/k}{1 - r^2}\right) \cdot \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0/k}{1 - r^2} \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

Para  $u_0 = 0$  e  $v_0 = 0$ ,

$$u(t) = \frac{F_0/k}{1 - r^2} [\sin(\omega t) - r \sin(\omega_0 t)] \quad (4)$$

Quando  $\omega \rightarrow \omega_0$ , tem-se  $r \rightarrow 1$  e a solução ressonante do sistema, eliminando a indeterminação da Equação (4), é tal que

$$u(t) = \frac{F_0}{k} [\omega_0 t \cdot \cos(\omega_0 t) - \sin(\omega_0 t)] \quad (5)$$

a qual, pode-se perceber, possui a amplitude aumentando com o tempo  $t$ , fazendo com que a cada ciclo a energia do sistema cresça e, conseqüentemente, os deslocamentos e esforços internos também. Se o sistema possui amortecimento, o que acontece com as estruturas reais em maior ou menor grau, a amplitude das oscilações do sistema é limitada. Para facilitar a modelagem, em geral, utiliza-se um amortecimento viscoso equivalente no

sistema, o qual produz uma força amortecedora proporcional à velocidade. Nesse caso, a equação de equilíbrio é dada por

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (6)$$

e sua solução torna-se

$$u(t) = e^{-\xi\omega_0 t} [A \cdot \cos(\omega_D t) + B \cdot \sin(\omega_D t)] + \frac{F_0/k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2}} \cdot \sin(\omega t - \alpha) \quad (7)$$

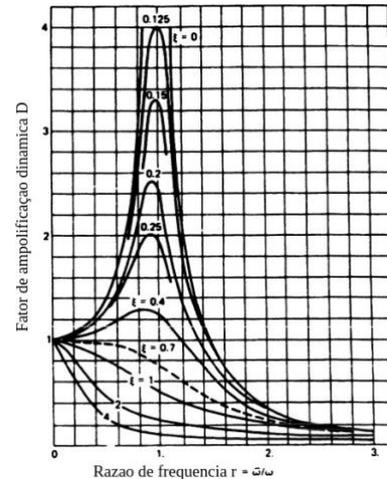
em que a razão de amortecimento viscoso  $\xi = c/c_{cr}$ ,  $c$  é o coeficiente de amortecimento do sistema,  $c_{cr} = 2\sqrt{k m}$  é o coeficiente de amortecimento crítico,  $\omega_D = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}$  é a frequência natural do sistema amortecido e  $\alpha$  é o ângulo de fase da resposta estacionária.

Se considerarmos o amortecimento, após algum tempo os primeiros termos transientes da solução desaparecem. Com isso, a solução torna-se

$$u(t) = Du_{est} \cdot \sin(\omega t - \alpha) \quad (8)$$

em que  $D = 1/\sqrt{(1-r^2)^2 + (2r\xi)^2}$  é o fator de amplificação dinâmica do movimento devido à proximidade da ressonância,  $u_{est} = F_0/k$  é o deslocamento quando a carga máxima é aplicada de forma quase-estática. Conforme mostrado na Figura 6, quando  $r \rightarrow 1$ , a amplitude aumenta, sendo tanto mais limitada quanto maior for o amortecimento. Para  $r = 1$ , tem-se que o fator de amplificação dinâmica é  $D = 1/2\xi$ .

**Figura 6 – Fator de amplificação dinâmica em função da razão de frequência e do amortecimento**



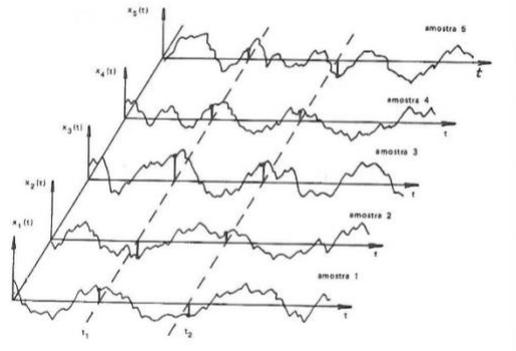
Fonte: Paz e Leigh (2004).

As ideias e conceitos anteriormente apresentados podem ser usados, guardadas as devidas diferenças, a sistemas com múltiplos graus de liberdade, como acontece nas estruturais reais.

Diante do exposto, pode-se concluir sobre a ponte Tacoma que, para que o vento induzisse comportamento ressonante na estrutura, seria necessário que as rajadas (variações bruscas na velocidade do vento em torno de um valor médio) tivessem comportamento periódico e constante com frequência próxima àquela de vibração natural da ponte. Esse comportamento é possível, porém improvável em vista do caráter errático e turbulento do vento natural. De acordo com Blessmann (2011), que foi o principal pesquisador em aerodinâmica das construções no Brasil, as rajadas de vento natural constituem um fenômeno aleatório e não permitem um tratamento determinístico, sendo necessária uma abordagem probabilística de seu perfil ao longo do tempo. A Figura 7 apresenta amostras de perfil de vento com rajadas aleatórias e evidencia a baixa probabilidade de essas rajadas de vento apresentarem comportamento periódico por tempo suficiente ao ponto de colapsar uma grande estrutura. É sempre possível que determinados harmônicos principais do perfil de velocidade possam atuar, mas não por um período longo a ponto de produzir os efeitos verificados. Além do mais, medições no local indicam que o vento, embora bastante intenso, não apresentava esse tipo de oscilação no dia do

evento (MILLER, 1963), excluindo a possibilidade de ressonância induzida diretamente pela força eólica.

**Figura 7 – Amostras de perfil de vento**

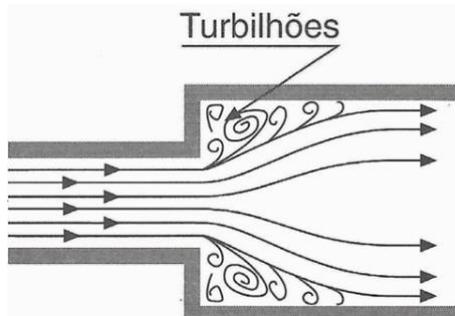


Fonte: Blessmann (2011).

Uma explicação plausível para o colapso da ponte Tacoma associada à ocorrência de ressonância poderia estar relacionada ao desprendimento alternado de vórtices, fenômeno típico da interação de fluidos com corpos rombudos.

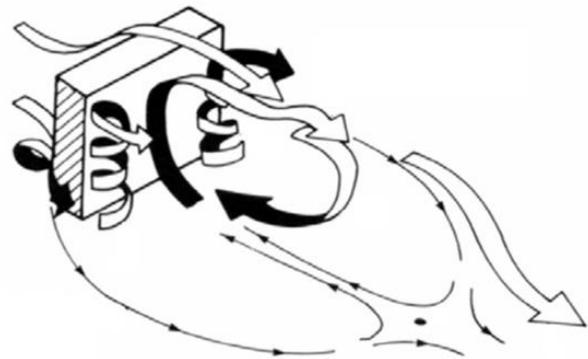
Os corpos rombudos, em oposição aos chamados corpos aerodinâmicos, são caracterizados por possuírem arestas vivas e por apresentam um descolamento entre as linhas de corrente do escoamento do vento e sua superfície. A existência dessas arestas cria zonas de baixa pressão para onde o ar (ou qualquer outro fluido) tende a escoar à medida em que há o descolamento com a superfície do sólido. Essa mudança abrupta de direção no gradiente de pressão gera uma série de movimentos rotacionais que caracteriza a formação de vórtices ou turbilhões (ver Figuras 8 e 9).

**Figura 8 – Desprendimento de vórtices em aresta viva**



Fonte: Netto (1998).

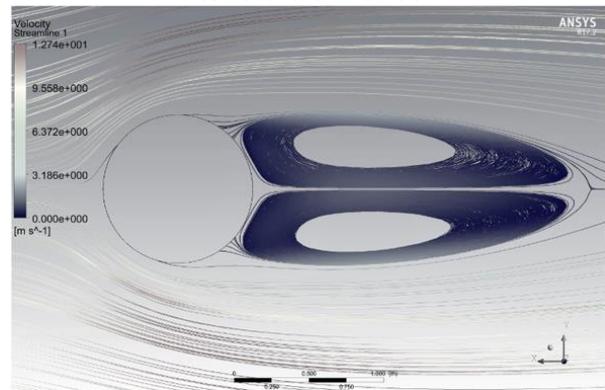
**Figura 9 – Desprendimento de vórtices em uma edificação rombuda**



Fonte: Cook (1985).

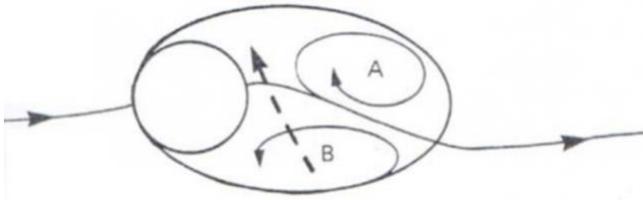
Mesmo em escoamentos com baixo número de Reynolds – baixa velocidade e/ou baixa viscosidade do fluido –, podem surgir vórtices estacionários a sotavento (região oposta à de onde sopra o vento) da edificação, como mostrado na Figura 10.

**Figura 10 – Vórtices estacionários a sotavento de estrutura cilíndrica**

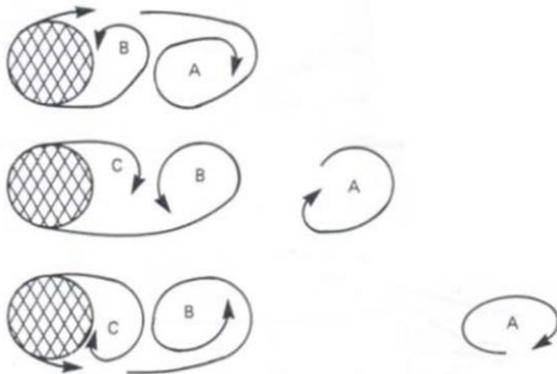


Fonte: acervo dos autores.

Entretanto, esse equilíbrio se torna instável com números de Reynolds a partir de aproximadamente 100 (SANTOS, 2019), valor muito abaixo dos tipicamente observados em Engenharia de Estruturas. A partir desse valor, pequenas perturbações no escoamento interrompem o equilíbrio entre os dois vórtices, fazendo com que um desses se desprenda da superfície do sólido e inicie uma sucessão de desprendimentos de vórtices, conforme as Figuras 11 e 12.

**Figura 11 – Início do desprendimento de vórtices**

Fonte: Cook (1985).

**Figura 12 – Desprendimento alternado de vórtices**

Fonte: Cook (1985).

Esse desprendimento alternado de turbilhões recebe o nome de vórtices de von Kármán e possui comportamento periódico que tende a excitar a estrutura na direção transversal ao escoamento com frequência bem definida. Nesses casos, quando um vórtice se desprende à direita da edificação, cria-se uma zona de baixa pressão que provoca um gradiente de pressão para a direita, provocando deslocamento na estrutura nesse sentido; em sequência, induz-se o desprendimento do vórtice à esquerda que, semelhantemente, provocará um gradiente de pressão para a esquerda e assim sucessivamente.

Quando a frequência de desprendimento de vórtices se aproxima da frequência natural de vibração de um determinado modo de vibração da estrutura, ocorre, de fato, uma amplificação da resposta por ressonância na direção ortogonal ao escoamento. Entretanto, ainda que fosse esse o fato ocorrido na ocasião do colapso da ponte, a maioria das explicações dos livros de Física citados aqui seria, no mínimo, insuficiente e, em muitos casos, equivocada, ao explicar a suposta ressonância com rajadas/impulsos/oscilações periódicas. Conforme se infere pelo mecanismo de

formação, a ocorrência de vórtices de von Kármán não está associada a oscilações naturais na velocidade do vento, mas podem ocorrer, inclusive, com vento em velocidade constante.

Apesar de ser uma explicação teoricamente viável, ressonância devido a vórtices de von Kármán não justifica por si só o colapso final da ponte, conforme visto nas imagens. A frequência com a qual os vórtices excitam a estrutura pode ser dada pelo número de Strouhal:

$$S = \frac{f_s D}{V},$$

em que  $S$  é o número de Strouhal,  $f_s$  é a frequência de Strouhal (que excita a estrutura),  $D$  é a dimensão característica da seção transversal da ponte e  $V$  é a velocidade de escoamento.

De acordo com Billah e Scanlan (1991), os dados da ponte são:  $S = 0,11$ ,  $D = 8 \text{ ft} \cong 2,4 \text{ m}$  e a velocidade do vento medida no local  $V = 42 \text{ mph} \cong 67,2 \text{ km/h}$ . Com isso, a frequência de excitação pelos vórtices seria próxima de  $1 \text{ Hz}$ , enquanto, no momento do colapso, a ponte apresentava vibração de 12 ciclos/minuto  $0,2 \text{ Hz}$  e, portanto, completamente dessincronizada da suposta excitação causadora da ressonância.

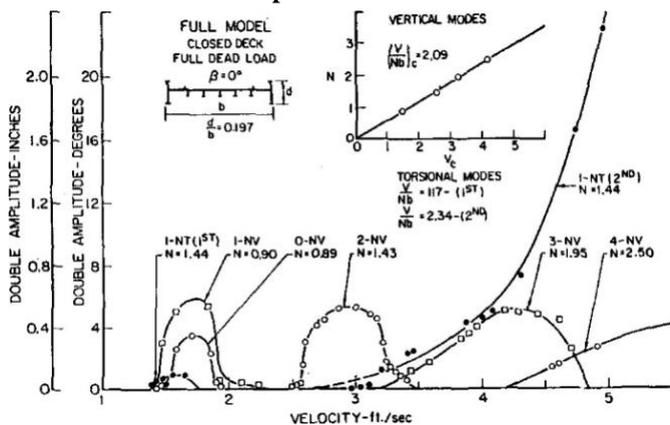
## CAUSAS DO COLAPSO DA PONTE

Conforme apresentado anteriormente, verifica-se que a ressonância em si não foi a causa do colapso da ponte, mas uma sucessão de eventos concorrentes. Embora na época do acidente as respostas para as suas causas tenham sido inconclusivas, estudos posteriores permitiram um entendimento mais acurado do colapso. Vale salientar que os fenômenos envolvidos no colapso são complexos e sutis, podendo se confundir, em alguns instantes, com o fenômeno da ressonância em si, o que explica a fácil aderência às explicações mais imediatas de pura ressonância provocada diretamente pela velocidade do vento.

A Figura 13 apresentada pelo professor Farquharson na década de 1950 é bastante útil para descrever o comportamento mecânico da

ponte. O gráfico referido mostra diversos modos de vibração obtidos experimentalmente para um modelo completo da ponte em escala 1/50. Conforme se pode perceber facilmente, quase todos os modos apresentam amplitudes limitadas, tendo sido acionados em outras ocasiões ao longo do tempo de utilização da ponte, porém sem conduzir ao colapso. A exceção ocorre particularmente no modo de vibração torsional identificado como “1-NT 2nd”, com frequência 1,44 Hz para o modelo reduzido. Corrigindo essa frequência pelo fator de escala (dividindo-a por  $\sqrt{50}$ ), chega-se a 0,2 Hz, que é exatamente a frequência verificada no instante do colapso. Com o aumento da velocidade do vento, a resposta desse modo de vibração é amplificada continuamente (BILLAH; SCANLAN, 1991).

**Figura 13 – Desempenho aeroelástico do modelo da ponte Tacoma**



Fonte: Billah e Scanlan (1991).

Note-se que, embora a ideia de amplificação ilimitada da resposta também seja um resultado de fenômenos de ressonância, as explicações são conceitualmente diferentes. No caso da ponte Tacoma, verifica-se um aumento da resposta torsional associado ao aumento da velocidade do vento, enquanto, na ressonância por desprendimento de vórtices, a resposta é amplificada com velocidade constante e sincronização das frequências natural e de desprendimento de vórtices de von Kármán.

Na década de 1970, Scanlan e Tomko (1971) reproduziram parte desses estudos e demonstraram que o que ocorreu na ponte Tacoma foi o que os autores chamaram de “flutter torsional de um grau de liberdade” devido à separação da camada limite. De

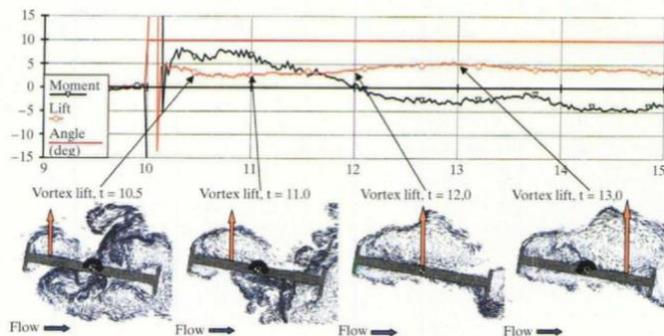
acordo com Simiu e Scanlan (1996), o termo flutter (drapejamento, em português), já foi utilizado para designar vários tipos de vibrações, sendo acompanhado por outros termos como drapejamento clássico, drapejamento de um grau de liberdade e drapejamento de painel. O drapejamento clássico consiste em uma instabilidade aerodinâmica que excita dois graus de liberdade de uma estrutura, torção e flexão, que se acoplam e aumentam com a velocidade do vento.

O fenômeno ocorrido na ponte pode ser caracterizado como uma auto excitação aerodinâmica que implicou em um “amortecimento negativo” no comportamento dinâmico da estrutura (BILLAH; SCANLAN, 1991). Em essência, quando o tabuleiro sofre alguma deformação torsional, o ângulo de ataque do vento muda, provocando subsequente aumento desse ângulo de torção (ver Figura 14). Naturalmente, a estrutura tende a voltar ao seu estado de equilíbrio, porém, com o movimento oscilatório, o ângulo de torção ultrapassa o plano horizontal até apresentar rotação no sentido oposto ao inicial, modificando novamente o ângulo de ataque do vento e gerando novo incremento na torção. Esse processo continua até que o ângulo de torção seja grande o suficiente para colapsar a estrutura, o que se configura como uma autoexcitação aerodinâmica.

A torção provocada pelo vento está, de fato, associada à geometria rombuda da ponte e ao desprendimento de vórtices; entretanto, mais uma vez, não se deve confundir esse comportamento com ressonância clássica. Os vórtices verificados nesse caso nada ou muito pouco têm a ver com o desprendimento alternado de vórtices de von Kármán. Esses últimos são formados naturalmente com a estrutura mesmo na posição de equilíbrio, enquanto os vórtices que amplificaram a resposta da ponte Tacoma foram originados do próprio movimento torsional do tabuleiro, portanto, caracterizando um movimento autoinduzido. É possível que o início das vibrações torsionais esteja associado a um dano em um dos cabos de sustentação da ponte, como aventado pelo relatório inicial do acidente, mas esse fato não foi absolutamente confirmado

(AMMANN; KÁRMÁN; WOODRUF, 1941). De qualquer forma, em outras palavras, o ponto é que não foram os vórtices que provocaram a deformação torsional por ressonância, foi a deformação que provocou o surgimento de vórtices.

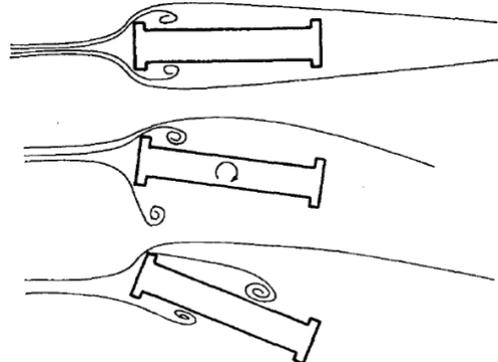
**Figura 14 – Variação no ângulo de ataque do vento relação ao tabuleiro com desprendimento de vórtices**



Fonte: Billah e Scanlan (1991).

Larsen (2000) demonstrou o mesmo mecanismo usando técnicas de fluidodinâmica computacional. O autor utilizou o programa CVM-FLOW para simular numericamente a estrutura e chegou a mesma conclusão supracitada. A Figura 15 apresenta a simulação da seção transversal da ponte onde há um deslocamento inicial do tabuleiro que altera o ângulo de ataque do vento. Inicialmente, os vórtices formados após a torção do tabuleiro provocam um gradiente de pressão à esquerda do eixo centroidal da seção, que conduz a um momento resultante no sentido horário. Posteriormente, o deslocamento dos vórtices e tendência de retorno à posição de equilíbrio da estrutura provocam uma mudança no gradiente de pressão para o lado direito do eixo, gerando um momento resultante no sentido anti-horário.

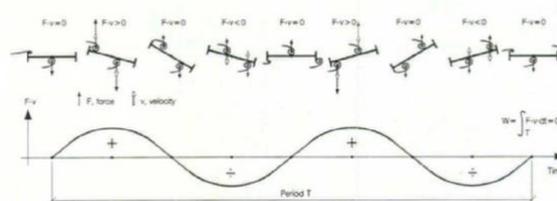
**Figura 15 – Simulação numérica da seção transversal da ponte Tacoma apresentando deslocamento do gradiente de pressão em função do ângulo de ataque do vento**



Fonte: Larsen (2000).

A Figura 16, do mesmo autor, também apresenta de forma esquemática esse processo ao longo do tempo. Larsen (2000) ainda ratifica que a geometria da seção transversal, uma vez deformada, foi responsável pelo amortecimento negativo; também verificou através de simulações que, caso as vigas laterais tivessem sido projetadas com alma vazada, esse amortecimento negativo e a formação de vórtices autoinduzida não teriam ocorrido e a estrutura teria sido preservada.

**Figura 16 – Padrão de desprendimento de vórtices autoinduzidos**



Fonte: Larsen (2000).

Da mesma forma, Feldman (2003) também afirma que o colapso da estrutura se deu por autoexcitação aerodinâmica. O autor apresenta as soluções dos modelos matemáticos que descrevem a estrutura sob movimento harmônico forçado e sob oscilação autoinduzida verificando que o comportamento da estrutura correspondeu ao segundo caso.

É difícil afirmar definitivamente a origem do equívoco com relação ao mecanismo de colapso da ponte Tacoma. Sabe-se que, à época do acidente, a teoria de estabilidade aerodinâmica de pontes suspensas ainda não estava totalmente estabelecida e túneis de vento

eram escassos, sendo geralmente reservados para projetos aeronáuticos militares (MILLER, 1963). Dessa forma, nenhuma explicação conclusiva foi oferecida nos anos imediatamente seguintes ao acidente, mas a associação com ressonância por vórtices de von Kármán era uma hipótese sugerida (LARSEN, 2000).

O relatório oficial publicado no ano seguinte ao do acidente (AMMANN; KÁRMÁN; WOODRUF, 1941) menciona algumas conclusões sobre os mecanismos e causas do colapso da estrutura, a saber: a ruptura ocorreu devido a oscilações excessivas; a ponte era muito flexível e tinha pouca capacidade de absorver cargas dinâmicas; apesar das solicitações nas vigas laterais, nenhum dano prévio foi verificado nelas; “parece razoavelmente certo” (AMMANN; KÁRMÁN; WOODRUF, 1941, p. 6) que um dos cabos no lado norte sofreu um deslizamento que iniciou a oscilação torsional; não houve problemas de baixa qualidade dos materiais ou na execução da obra; e, notadamente importante, os autores sugerem novos experimentos e estudos analíticos para investigar a ação de forças do vento em pontes suspensas. Particularmente, Larsen (2000) atribui a essa investigação inicial inconclusiva a origem das confusões a respeito do mecanismo de ruptura da ponte.

Não obstante, já na década seguinte, em 1954, os já mencionados estudos do professor Farquharson e demais estudos na década de 1970 já ofereciam explicações mais apropriadas e não relacionadas com a ressonância citada nos livros de Física básica. O artigo de Billah e Scanlan (1991), publicado há mais de 30 anos, teve ampla repercussão, especialmente no meio dos físicos, e praticamente encerrou o assunto, pelo menos do que diz respeito às causas do colapso e aos equívocos relacionados à ressonância.

É um tanto surpreendente, portanto, que, mesmo tanto tempo depois, explicações pouco apropriadas a respeito de um evento tão popular ainda sejam oferecidas a jovens estudantes de Física e Engenharia, levando-os a noções equivocadas sobre ação do vento e fenômenos de ressonância. Talvez justamente a popularidade da ponte ofereça uma

oportunidade atraente para exemplificar consequências práticas de conceitos que soam abstratos para estudantes que estão tendo o primeiro contato com o assunto. De qualquer forma, a utilização de exemplos inapropriados pode conduzir a lacunas na formação científica de jovens estudantes quando fenômenos complexos são equivocadamente explicados de forma simplória e reducionista.

Feldman (2003) nota que trabalhos como o do professor Farquharson, na década de 1950, e o artigo Billah e Scanlan (1991) não deixam mistério quanto às causas do acidente. O verdadeiro mistério, segundo ele, é porque os cursos de Física básica não têm ensinado a explicação correta do colapso da ponte Tacoma Narrows por todos esses anos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma revisão nos textos de Física básica demonstrou que existe, de forma equivocada, uma quase unanimidade nas explicações sobre as causas do colapso da ponte Tacoma Narrows, as quais atribuem a falha ao fenômeno da ressonância devido às rajadas de vento ou mesmo ao desprendimento periódico de vórtices. No entanto, pesquisas cuidadosas demonstraram que a causa do colapso foi uma sucessão de eventos, sendo caracterizada como uma autoexcitação aerodinâmica que implicou em um “amortecimento negativo” no comportamento dinâmico da estrutura. A geometria altamente não aerodinâmica da seção transversal da ponte pode ser apontada como um fator importante, que conduziu ao amortecimento negativo e consequente à vibração torsional autoinduzida.

Por fim, espera-se que este texto contribua com professores e estudantes de Física e Engenharia no entendimento adequado do colapso da ponte Tacoma Narrows à luz dos conhecimentos atuais em Engenharia do Vento e de aerodinâmica de estruturas. Com isso, busca-se chamar a atenção para a importância das investigações científicas para entender e explicar eventos de falhas, gerando conhecimentos que evitam a repetição de erros, principalmente em problemas envolvendo fenômenos complexos.

## REFERÊNCIAS

- AMMANN, O. H.; KÁRMÁN, T. V.; WOODRUF, G. B. Report - **The Failure of the Tacoma Narrows Bridge**. 1941.
- BARRETO, F. B.; SILVA, C. X. **Física Aula por Aula**. São Paulo: FTD, 2016.
- BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. **Tópicos de Física**. São Paulo: Saraiva, 2012.
- BILLAH, K. Y.; SCANLAN, R. H. Resonance, tacoma narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks. **American Journal of Physics, College Park**, v. 59, n. 2, p. 118-124, 1991.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Estruturas**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011.
- BONJORDO, J. R. et al. **Física**. São Paulo: FTD, 2016.
- CALÇADA, C. S.; SAMPAIO, J. L. **Física Clássica**. São Paulo: Atual Editora, 2012.
- COOK, N. J. **The designer's guide to wind loading of building structures**. Part 1: background, damage survey, wind data and structural classification. Londres: Butterworths, 1985.
- FELDMAN, B. J. What to say about the tacoma narrows bridge to your introductory physics class. **The Physics Teacher**, Melville, v. 41, p. 92-96, 2003.
- FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Física Básica**. Volume único. São Paulo: Atual Editora, 1998.
- FULLER, R. G.; ZOLLMANN, D. A.; CAMPBELL, T. C. The puzzle of the tacoma narrows bridge collapse. **Twin views of the Tacoma Narrows bridge collapse**, College Park, v. 1, n. 1, p. 8-25, 1979.
- GUIMARÃES, O.; PIQUEIRA, J. R.; CARRON, W. **Física**. São Paulo: Editora Ática, 2016.
- IRWIN, P. A. et al. Tacoma narrows 50 years later - wind engineering investigations for parallel bridges. **Bridge Structures**, Ontario, v. 1, n. 2, p. 3-17, 2015.
- LARSEN, A. Aerodynamics of the tacoma narrows bridge. **Structural Engineering International**, Londres, n. 4, p. 243-248, 2000.
- MILLER, J. F. Tacoma narrows bridge collapse. **Twin views of the Tacoma Narrows bridge collapse**, College Park, v. 1, n. 1, p. 1-7, 1963.
- MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. **Física**. Volume Único. São Paulo: Editora Scipione, 2013.
- NANI, A. P. et al. **Física - Ser Protagonista**. São Paulo: Edições SM, 2016.
- NETTO, A. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Blucher, 1998.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2002.
- OLIVEIRA, M. G. K. Desenvolvimento de uma balança dinâmica de três graus de liberdade para estudo do efeito de flexo-torção em edifícios altos submetidos à ação do vento. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- PAZ, M.; LEIGH, W. **Structural Dynamics: theory and computation**. 5th. ed. New York: Springer Science Business Media, 2004.
- RAMALHO, J. F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Os fundamentos da Física**. São Paulo: Moderna, 2012.
- SANTOS, M. L. **Estruturas de seção circular sob ação do vento via simulação numérica de alta fidelidade**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- SCANLAN, R. H.; TOMKO, J. J. Airfoil and bridge deck flutter derivatives. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, Reston, v. 6, n. 97, p. 1717-1737, 1971.
- SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structures: an introduction to wind engineering**. New York: Wiley-Interscience, 1996.
- UNKOWN. **Opening day of the Tacoma Narrows bridge**, Tacoma, Washington. 1940.

Disponível em:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opening\\_day\\_of\\_the\\_Tacoma\\_Narrows\\_Bridge,\\_Tacoma,\\_Washington\\_\(4861196200\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opening_day_of_the_Tacoma_Narrows_Bridge,_Tacoma,_Washington_(4861196200).jpg). Acesso em: 23 jun. 2020.

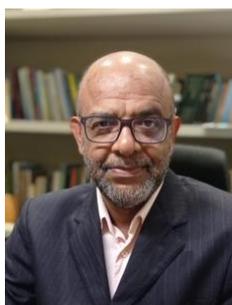
YAMAMOTO, K.; FUKU, L. F. **Física para o Ensino Médio**. São Paulo: Editora Saraiva, 2016.

---

## DADOS BIOGRÁFICOS DOS AUTORES



**Matheus Seidel** – Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) e mestrado em Engenharia Civil e Ambiental pela mesma instituição com pesquisa na área de Aerodinâmica das Estruturas, realizando simulação numérica da ação do vento em edificações. Possui experiência docente na área de Física, Engenharia Civil e Arquitetura. Atualmente está cursando doutorado em Engenharia Civil pela COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, com pesquisa também em Aerodinâmica das Estruturas e Engenharia do Vento Computacional.



**Geraldo José Belmonte dos Santos** – Possui graduação em Engenharia Mecânica (1991 – UFBA), mestrado em Engenharia Civil e Ambiental (2010 – UEFS) e doutorado em Modelagem Computacional (2016 – LNCC/MCTI). Atualmente é professor adjunto na Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), em Feira de Santana/BA, onde atua nos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Civil, lecionando disciplinas e orientando alunos nas áreas de análise e modelagem computacional de elementos e sistemas de engenharia. Tem experiência nas áreas de modelagem matemática e computacional de problemas de engenharia, formulação e análise de métodos numéricos, método dos elementos finitos, integridade estrutural, mecânica dos sólidos e estrutural, dinâmica estrutural, projeto e análise de sistemas mecânicos, modelagem de sistemas multifísicos acoplados. Assumiu diversos cargos administrativos na UEFS, sendo que os mais destacados são os de Diretor do Departamento de Tecnologia e de Pró-Reitor de Ensino de Graduação.