



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VII**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS - CCEA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

ARTHUR KLENIO RODRIGUES DE LIMA

PONTE TACOMA: O QUE APRENDEMOS COM ELA?

**PATOS
2022**

ARTHUR KLENIO RODRIGUES DE LIMA

PONTE TACOMA: O QUE APRENDEMOS COM ELA?

Trabalho de Conclusão de Curso Artigo apresentado ao Departamento do Curso de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de licenciatura em Física.

Orientador: Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior

**PATOS
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

L732p Lima, Arthur Klenio Rodrigues de.
Ponte tacoma [manuscrito] : o que aprendemos com ela? /
Arthur Klenio Rodrigues de Lima. - 2022.
23 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Exatas
e Sociais Aplicadas , 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Junior ,
Coordenação do Curso de Licenciatura em Física - CCTS."

1. Estudo da Física. 2. Ponte Tacoma Narrows. 3.
Ressonância. 4. Vibração. I. Título

21. ed. CDD 530.7

ARTHUR KLENIO RODRIGUES DE LIMA

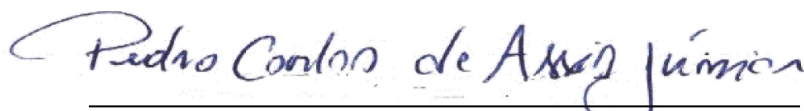
PONTE TACOMA NARROWS: O QUE APRENDEMOS COM ELA?

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

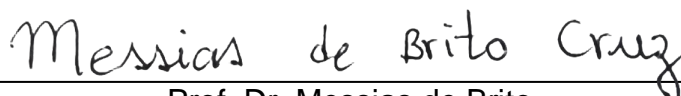
Área de concentração: Ensino de Física.

Aprovado em 13/07/2022

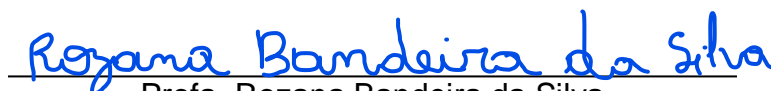
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Messias de Brito
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Rozana Bandeira da Silva
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. HISTÓRIA DA PONTE DE <i>TACOMA NARROWS</i>	7
3. METODOLOGIA.....	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
4.1 RESSONÂNCIA E EFEITOS NÃO-LINEARES.....	11
4.2 EFEITOS NÃO LINEARES	14
4.3 PONTES MODERNAS	16
4.4 OUTROS SISTEMAS DE CONTOLES DE OSCILAÇÕES.....	18
4.1.1 SISTEMAS VISCO-ELÁSTICOS.....	18
4.1. 2 SISTEMAS PENDULARES	19
7 CONCLUSÃO.....	20
REFERÊNCIAS.....	22

PONTE TACOMA NARROWS: O QUE APRENDEMOS COM ELA.

Arthur Klenio Rodrigues de Lima ^{1*}

RESUMO

O fenômeno da ressonância está presente em vários ramos da física. A compreensão desse fenômeno proporcionou a humanidade um ganho inestimável, e para que não tenhamos dúvida sobre isso, basta lembrar do exame de ressonância magnética. Este exame tem detectado com antecedência diversas mazelas destruidoras da vida, e assim, podendo ser tratadas em tempo hábil. Além do magnetismo, ela está presente em outros ramos da física, e sempre traz benefícios valiosos à humanidade. O presente trabalho aborda estudos sobre o desabamento da ponte de *Tacoma Narrows*, uma ponte do tipo pênsil que foi construída no ano de 1940 na cidade de Washington nos Estados Unidos, as pontes do tipo pênsil são estruturas suspensas por cabos que se tornaram muito comuns no século XIX, as pesquisas mostraram sobre a interação vento/estrutura, conseqüentemente o efeito da ressonância e os efeitos não lineares que poderiam ser observados nesse acontecimento histórico, o mesmo fomentou estudos e pesquisas mais avançadas sobre o assunto. Observando as contribuições que esse evento trouxe para ciência evitando erros posteriores. O vento foi um dos maiores vilões. Causando uma grande vibração em seu leito, ocorrendo um efeito chamado ressonância.

.

Palavras-chave: Ponte Tacoma. Ressonância. Vibração.

ABSTRACT

The present work deals with studies on the collapse of the *Tacoma Narrows* Bridge, a suspension bridge that was built in the year 1940 in the city of Washington in the United States, suspension bridges are structures suspended by cables that have become very common in the XIX century, research showed on the wind/structure interaction, consequently the effect of resonance and the non-linear effects that could be observed in this historical event that fostered more advanced studies and research on the subject. Thus observing the contributions that this event brought to science, thus avoiding later errors. The wind was one of the biggest villains, causing a great vibration in its bed causing an effect called resonance.

Keywords: Tacoma Bridge. Resonance. Vibration.

1. INTRODUÇÃO

A palavra ressonância tornou-se bastante popular atualmente. A maioria das pessoas associa ao exame de ressonância magnética, usado largamente para detecção de doenças nas mais diversas regiões do corpo humano. O fenômeno de ressonância é estudado em vários ramos da física, tais como: na mecânica (balanças oscilatórias); nos efeitos sonoros (osciladores harmônicos, na construção de notas musicais); em circuitos elétricos que possuem capacitores e indutores (estão presentes em tv, rádios, celulares, computadores, etc); na óptica (laser), e em particular, na ressonância magnética (quando provocamos ressonância do campo magnético dos prótons).

No geral, consideremos um objeto que possuem uma frequência natural de oscilação de suas moléculas ou átomos. O fenômeno de ressonância ocorre quando enviamos a esse objeto uma segunda frequência igual ou próxima de sua frequência natural. Assim, provocamos um aumento na amplitude de oscilação desse objeto, tal que, nenhuma outra frequência proporciona. Como exemplo citamos que uma criança esteja em um parque ou praça que possua um balanço. Com a ajuda do seu colega, ele começa a brincar no balanço. Seu colega vai aplicando uma força de maneira que o balanço só aumento sua amplitude de oscilação. Neste caso, ocorreu um fenômeno de ressonância mecânica. Caso, seu colega aplicasse uma força que retardasse o balanço, diminuindo a amplitude não teríamos a observação do fenômeno de ressonância.

Neste trabalho, escolhemos observar o fenômeno de ressonância que ocorreu em uma ponte que ficou muito famosa, a ponte de *Tacoma Narrows*, uma ponte suspensa. As pontes suspensas são uma obra de arte da engenharia, e sua finalidade é transpor grandes vãos, a maioria delas são estruturas metálicas. Primeiro este tipo de construção data de meados do século XIX, e muitas delas sofreram colapso devido à falta de conhecimento sobre a interação vento/estrutura, porque este efeito causa vibrações e ressonância nas estruturas.

Sabemos que atualmente a sociedade desfruta de inúmeros avanços, descobertas científicas e tecnológicas. Importantes acontecimentos como esse do desabamento da ponte de Tacoma inspiram e fomentam estudos aprofundados para evitar erros posteriores, com esse intuito vamos analisar neste trabalho o desmoronamento de uma ponte construída nos anos de 1940 nos estreitos de Tacoma na cidade de Washington – EUA. O colapso da ponte suspensa de Tacoma em 1940, estimulou estudos detalhados sobre a sua queda que teve como causa principal a força dos ventos e suas consequências.

A sua queda também promoveu pesquisas mais avançadas sobre o comportamento de outras pontes e edifícios sob a influência de forças externas. Pesquisas conduzidas na época mostram que o colapso foi causado por um fenômeno linear, a ressonância. No entanto, estudos recentes como o de Lazer e Mckenna afirmam que a causa se deve também a efeitos não lineares.

A dramática catástrofe da Ponte de Tacoma em ainda está à vista do público hoje. É importante notar que em muitos livros de física de graduação, a catástrofe é usada como um exemplo da ressonância forçada de um oscilador mecânico, e o vento fornece uma frequência periódica externa correspondente à frequência da estrutura natural.

Tendo em vista que o vento causou uma grande vibração vertical em seu leito. Após o colapso da ponte *Tacoma Narrows*, a comunidade científica buscou entender melhor os fenômenos ondulatórios e, finalmente, fizeram um grande progresso.

No geral, objetivamos, analisar as possíveis causas do desmoronamento da ponte suspensa de *Tacoma Narrows*. E do ponto de vista específico buscamos: conhecer um pouco da história da ponte de *Tacoma Narrows*; mostrar o que a comunidade científica pôde extrair observando as causas do desmoronamento da ponte, bem como, conhecer tecnologias de redução do impacto do fenômeno natural da ressonância atuante em grandes construções.

2. HISTÓRIA DA PONTE DE TACOMA NARROWS

As pontes do tipo pênsil são estruturas suspensas por cabos que se tornaram muito comuns no século XIX. O caso da ponte de *Tacoma Narrows* (Figura 1) ficou muito conhecido mundialmente, por físicos e engenheiros civis,

que se desafiaram a desvendar o problema do seu desmoronamento que até hoje é assunto de pesquisas e teorias sobre o que influenciou o desabamento. (Castro et al. ,2019).

Figura 1: Homem correndo na ponte *Tacoma Narrows* durante a oscilação.



FONTE: CASTRO et al. (2019).

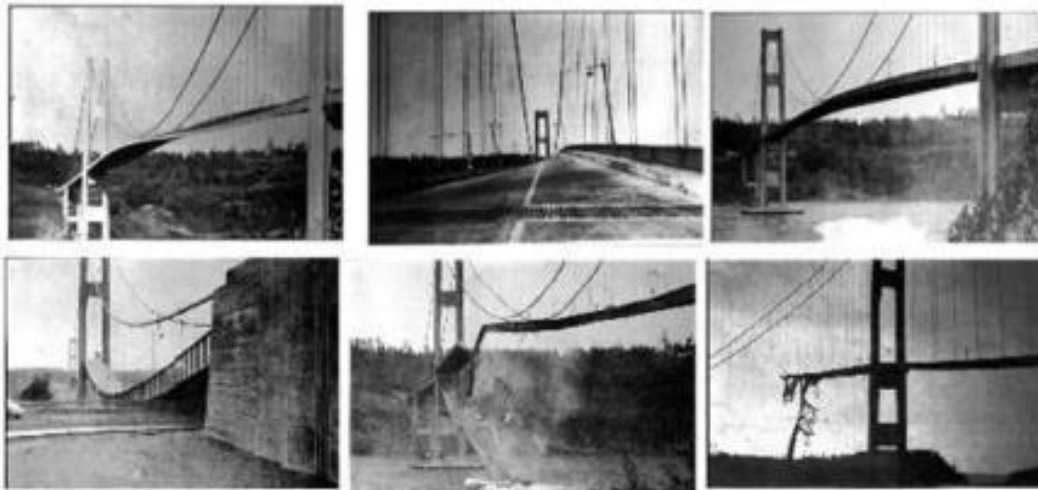
Quanto às suas características e sua localização Castro et al. (2019) descreve:

A ponte ficava situada no condado de Pierce (Washington, EUA) e tinha um modelo de ponte pênsil com dois pilares, que se caracterizava por possuir um suporte simples de duas vigas em I, paralelas, composta por uma pequena estrutura interna, tendo seu suporte de 2,4 metros de espessura. Castro et al. (2019).

A ponte de Tacoma foi inaugurada no dia 1 de julho de 1940. após exatamente quatro meses e seis dias da sua inauguração, as 11 horas do dia 7 de novembro do mesmo ano, inicia o seu colapso, começando a cair os seus primeiros pedaços, logo em seguida os cabos de aço começam a se romper (SOARES; BARBOSA, 2012), no dia do desabamento fomenta que a ponte foi atingida por rajadas de ventos de 60km/h à 70km/h, onde a amplitude máxima das vibrações de torção foi de 35°, e a frequência de ressonância foi de aproximadamente 0,2Hz, a mesma desmoronou causando uma queda de seção de mais de 600m, após 10 minutos a ponte cai por inteira (Figura 2). (CASTRO et al.,2019)

Existem teorias que tentam explicar sobre o desabamento da ponte Tacoma, colocando em ênfase duas delas: a do fenômeno linear, a ressonância mecânica listados por alguns livros de física como Halliday e Tipler e o fenômeno das forças não lineares.

Figura 2: Sequência de fotos do desabamento da ponte de *Tacoma Narrows*.



FONTE: CASTRO et al. (2019).

Na figura 2, observamos que a ressonância foi tão intensa que a ponte não aguentou, sendo destruída completamente. Para uma pessoa leiga, parecia ser impossível que algo dessa natureza pudesse acontecer. Seria, no mínimo, algo extraordinário. A seguir, apresentamos na metodologia.

3. METODOLOGIA

A ponte *Tacoma Narrows* mundialmente conhecida por sua catástrofe virou alvo de estudos aprofundados, que inicialmente atribuiu somente ao fato da ação do vento que fez com que ela vibrasse até um valor máximo suportável até chegar ao seu rompimento. Esse fato despertou o interesse de vários estudiosos, engenheiros e físicos do mundo todo, essencialmente para não cometer o mesmo erro em construções futuras e também para explicar o real motivo de sua queda.

Também motivado a entender um pouco mais sobre o fenômeno da ressonância e qual sua influência em grandes construções, fiz uma pesquisa bibliográfica em livros, revistas e sites dando início a esse trabalho.

. Grandes construções como edifícios, pontes, etc. estão sujeitos a fortes vibrações, causadas tanto por fenômenos naturais, tais como: vento, terremoto,

entre outros, quanto pelos usuários como no caso das pontes que trafegam caminhões transportando toneladas em suas cargas, e essas estruturas precisam estarem preparadas para tais acontecimentos.

Inspirado em tudo aquilo que li sobre a ponte de *Tacoma Narrows*, construir um referencial teórico visando a análise do fenômeno causador de sua destruição em que envolve o fenômeno de ressonância e que outros pesquisadores destacam ter sido causado por outras teorias que não está associada a ressonância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estruturas que desenvolvem grandes amplitudes de oscilações tem sua estabilidade e segurança comprometidas, a exemplo temos: grandes edifícios, grandes navios, grandes aviões, estruturas planas de grandes áreas, etc. Quanto maior a estrutura mais possibilidade de que tenhamos vibrações relevantes. Caso as vibrações aumentem bastantes, teríamos a possibilidade de destruição do próprio objeto em questão, e assim causando perdas financeiras, e até mesmo dos possíveis usuários dessas estruturas. Diante do exposto buscamos entender as causas e consequências da queda da ponte suspensa de *Tacoma Narrows*, mostrando que a partir do exemplo do seu desmoronamento, abriu portas para que pesquisadores do mundo inteiro pudesse entender melhor a interação entre vento/estrutura, e assim aperfeiçoar técnicas e tecnologias que tenham a finalidade de diminuir vibrações, essas, na maioria das vezes, causadas pelas forças naturais dos ventos.

Na ponte de Tacoma é uma estrutura enorme com um grande vão livre. Inicialmente os engenheiros e seus construtores não consideraram que ela sofreria com o efeito da ressonância, mesmo sabendo que a ponte receberia rajadas de ventos de até 70km/h. Infelizmente, logo constatou-se que vibrações por efeito da ressonância eram muito fortes, e que ocasionou em seu rompimento total. O mais interessante, a posteriori, foi que pesquisadores descobriram que o efeito da ressonância não foi unicamente o causador desse desastre, apesar de sua grande contribuição, outro fenômeno dito não linear chamado de vórtice de Von Karman, somado ao fenômeno da ressonância culminaram, causando o seu desabamento. De modo geral, a interação não

linear entre a ponte e as forças externas seria a responsável. A seguir, tratamos de conhecer melhor a ressonância e os efeitos não lineares.

4.1 RESSONÂNCIA E EFEITOS NÃO-LINEARES

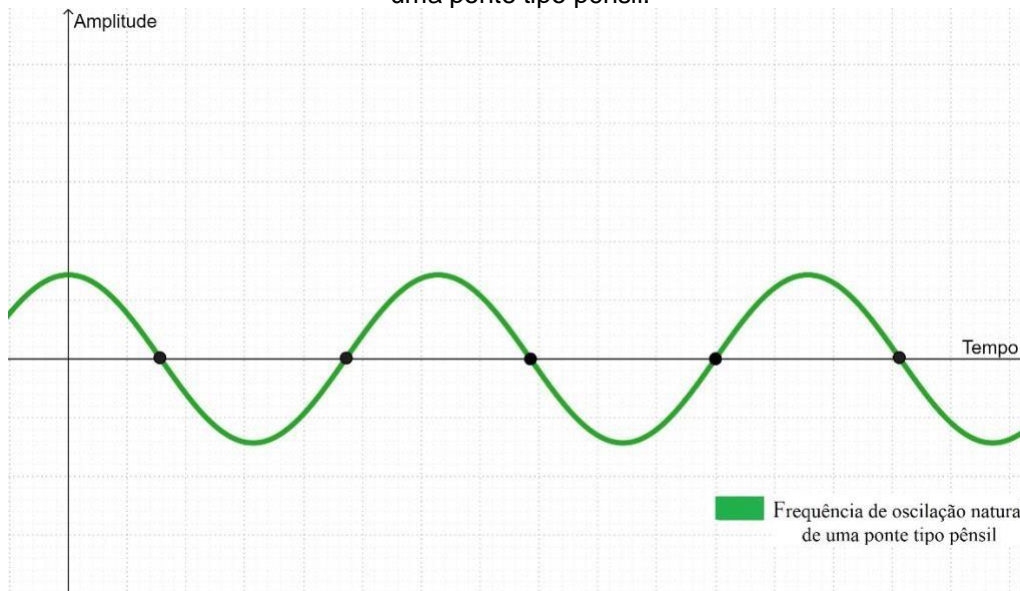
Vamos entender primeiramente o que é ressonância. Segundo (SEARS; YOUNG, 2008) “A ressonância é o fenômeno que ocorre quando existe um pico de amplitude provocado por uma força cuja frequência está próxima da frequência da oscilação natural do sistema”.

Se observarmos bem, perceberemos facilmente exemplos de ressonância no nosso dia a dia, como o que se obtém quando se empurra uma criança em um balanço, que podemos generalizar como um pêndulo simples, onde sua frequência natural depende de seu comprimento. Se a frequência de empurrões ou de balanços não for próxima à frequência de ressonância dificilmente se consegue o balanço natural, pois o pêndulo sofrerá vibrações aleatórias. (GIL, 2011)

Todo sistema físico capaz de vibrar tem uma ou mais frequências naturais, ou seja, que são características do próprio sistema. Caso, um sistema físico seja excitado periodicamente, por algum tipo de onda que, em particular, foi a rajada de vento, causando uma sobreposição de onda na ponte. De alguma forma a tempestade atingiu uma frequência que causou a sobreposição da onda. Assim, alterando a energia da ponte e modificando sua amplitude de vibração.

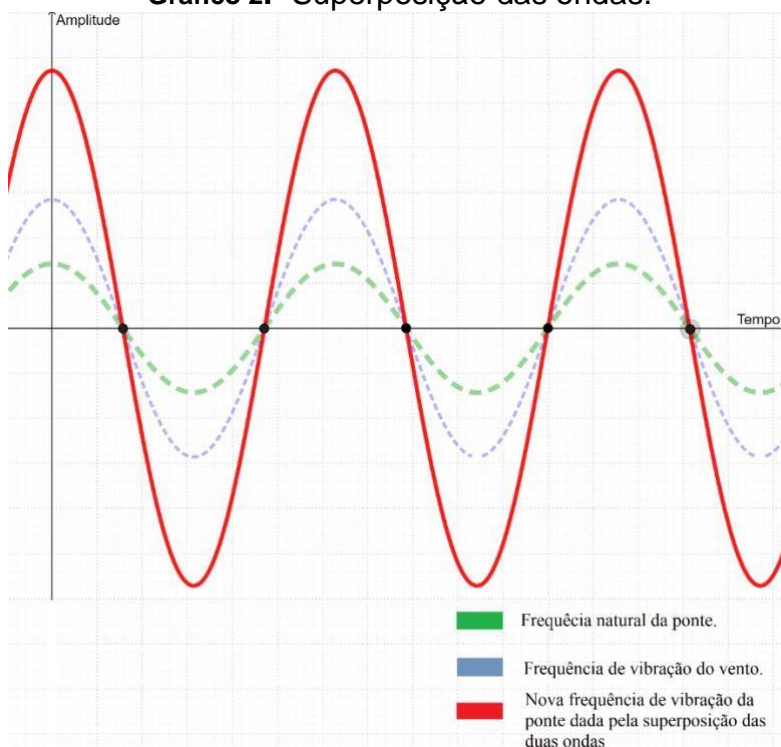
Como vamos observar a seguir, podemos imaginar uma ponte do tipo pênsil com frequência de oscilação natural **(ver gráfico 1)**.

Gráfico 1: Representação da frequência de oscilação natural de uma ponte tipo pênsil.



FONTE: Própria (2022)

A frequência natural é algo intrínseco a estrutura das moléculas que compõe a ponte. Por si só, sabemos que existe uma frequência de vibração causada pelas condições externas. Após a ponte ser excitada periodicamente por rajadas de ventos criou-se uma nova frequência de vibração (**ver gráfico 2**). Então, a nova frequência de vibração da ponte, é dada pela superposição das duas ondas, como mostra o gráfico 2. A curva vermelha possui a amplitude de oscilação dada pela soma das amplitudes da onda de frequência natural mais a onda causada pela rajada de vento.

Gráfico 2: Superposição das ondas.

FONTE: Própria (2022)

Portanto, se a frequência natural de oscilações do sistema e excitações constantes sobre ela estiver sob a mesma frequência, a energia do sistema será aumentada, causando vibração com amplitudes crescentes, isso aconteceu na ponte de Tacoma. Com ventos a cerca de 70 km/h vibrantes a uma frequência igual à frequência natural da ponte, a largura das vibrações da ponte aumentou de tal forma que sua estrutura não poderia suportá-la.

Segundo A. M. Luiz, (2000) *“Um fenômeno de ressonância pode ocorrer toda vez que a frequência da excitação de um sistema físico for igual a frequência natural das oscilações do sistema”*. Contudo, a ponte *Tacoma Narrows*, apesar das teorias que o seu desabamento ocorreu, e a ressonância foi apontada como o fator principal da sua falha, em outra linha de pensamento, mais não excluindo a ressonância outros autores como Lazer e McKenna consideram que a possível causa do desabamento tenha sido o choque entre a frequência natural da ponte e a força externa exercida pelo vento, com o não-amortecimento do sistema, fez com que os cabos da ponte fossem se modelando ao movimento vibratório dela, então um segundo tipo de oscilação foi observado

pouco tempo antes do eventual desabamento que foi a oscilação de modo torção.

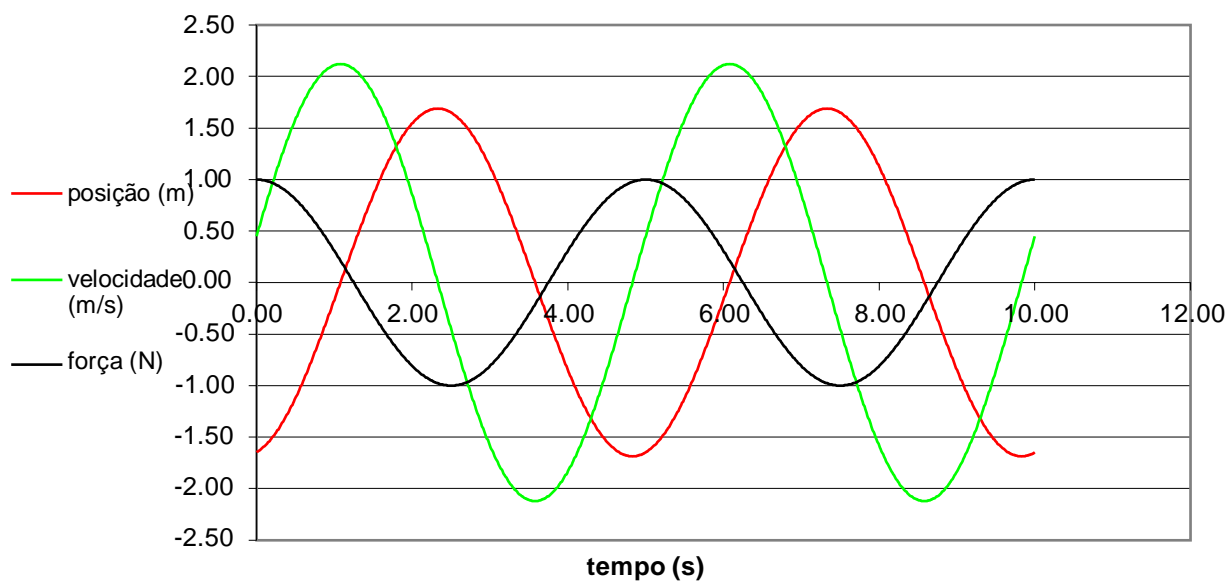
Entendia-se que, quando uma rajada de vento sopra horizontalmente, uma área de baixa pressão será formada, e vórtices de cima para baixo e de baixo para cima aparecem alternadamente, gerando forças periódicas verticais que atuam na direção da vibração da ponte pênsil. Em sua pesquisa, o engenheiro húngaro Theodore von Karman atribuiu a possível causa do dano ao "efeito Von Karman" (Cavalcanti, 2015).

Portanto o efeito de Von Karman segundo Cavalcanti (2015) “Consiste num escoamento giratório onde as linhas de corrente apresentam um padrão circular ou espiral”. Este tipo de oscilação foi observado após a ponte entrar em um grande movimento vertical, o que aparentemente induziu um deslizamento de uma parte crucial da ponte chamada de faixa de cabo, que ligava o centro do cabo para o leito da estrada, (Lazer; McKenna, 1990). Assim deve ser enfatizado que no movimento de torção observado, alguns dos cabos estavam se afrouxando e apertando alternadamente. Este é um efeito não linear, que estudaremos a seguir.

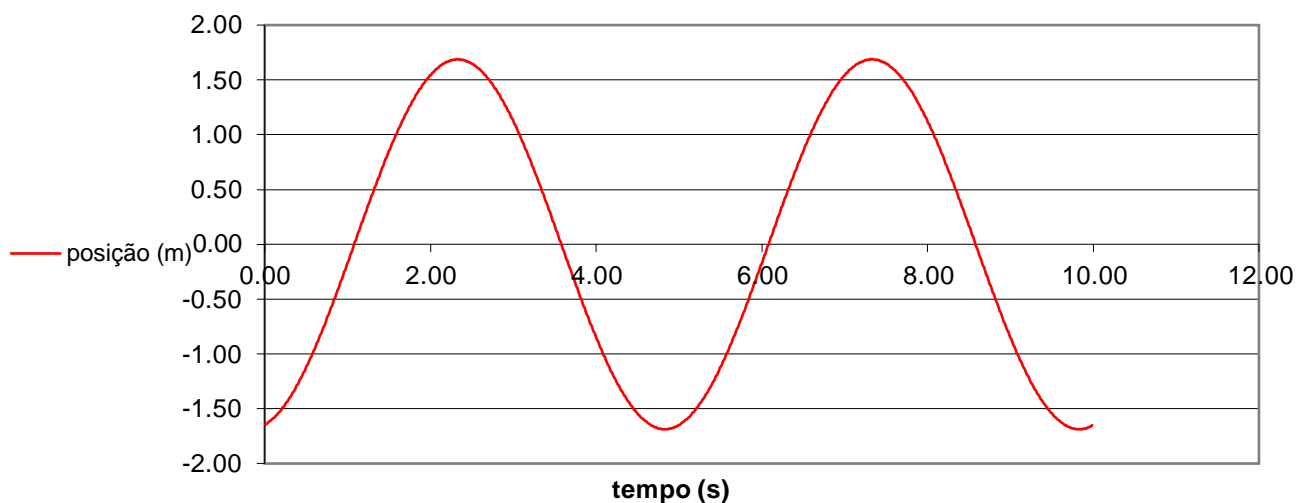
4.2 EFEITOS NÃO LINEARES

Como alguns pesquisadores afirmam, o fenômeno de ressonância não foi o único fator contribuinte para a catástrofe da ponte de Tacoma. Uma explicação plausível vem de um dos modelos apresentados por Lazer e McKenna. A sua teoria fala que os efeitos não lineares eram os principais vilões, e levaram a ponte de *Tacoma Narrows* a desestabilizar-se e posteriormente entrar em colapso. No mais, as interações não lineares entre a ponte e as forças externas seriam os reais responsáveis pela sua destruição. Então, ele propôs em seu artigo que, quando cabos verticais estão sob o efeito da tensão eles atuam como uma mola elástica, dessa forma, a equação diferencial é linear, como mostra a equação (1) .

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x = F \sin \gamma t \quad (1)$$

Gráfico 3 : Posição, velocidade e força externa em função do tempo.

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 4 : posição em função do tempo.

Fonte: Próprio autor.

onde F_0 é uma constante, $\omega^2 = \frac{k}{m}$, $\lambda = \frac{\beta}{2m} = \gamma$ (constante da mola), (massa conectada), (constante de amortecimento) e $\omega \neq \gamma$.

Para haver ressonância, é necessário que o sistema seja livre de amortecimento, então considerando que o termo de amortecimento seja zero, ou seja, que $\lambda = 0$ na equação (1). Obtemos a equação (2) que é a diferencial da ressonância.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\lambda \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = F_0(t) \quad (2)$$

Para vibrações causadas por forças externas, os cabos de aço não estão o tempo todo sob tensão. De acordo com Lazer-McKenna (1990), a não-linearidade lhe dá o fato de que diferentes cabos podem ser tensões em momentos diferentes, e, portanto, leva a oscilações de grandes amplitudes com forças externas moderadas. Na ausência de amortecimento, um modelo não-linear para o movimento forçado é dado pela equação (3).

$$\frac{d^2x}{dt^2} + F(x) = g(t) \quad (3)$$

onde $F(x)$ é definida por partes: $F(x) = \{bx, x \geq 0; ax, x < 0\}$ $g(t)$ é a força aplicada e m é a massa da seção da pista. A equação 3 é linear para $x \geq 0$ ou $x < 0$.

Lazer e McKenna concluíram que os efeitos não lineares foram os principais causadores dos danos e do colapso subsequente da ponte *Tacoma Narrows*. De modo geral, a interação não linear entre a ponte e as forças externas seria a responsável. Soluções numéricas contidas no modelo de Lazer-McKenna reforçam as observações no colapso da ponte *Tacoma Narrows*, dando mais um passo para melhor compreensão deste caso.

4.3 PONTES MODERNAS

Para efetuar o controle de oscilações causadas pelo vento, e as interações entre vento e estrutura, as pontes modernas desfrutam de algumas tecnologias desenvolvidas para esse intuito, como o sistema de controle de oscilações do tipo massa – mola. Senem (2016) descreve em seu trabalho que:

O sistema massa – mola, como o próprio nome sugere, é composto por uma ou mais molas, amortecedores e massa, acoplados na estrutura que se deseja atenuar vibrações, tal dispositivo tem o mesmo princípio do absorvedor pendular, que é absorver as oscilações e dissipá-las em forma de energia cinética.

Essa tecnologia foi empregada com sucesso na ponte Rio – Niterói, que oscilava causando problemas de utilização e desconforto para os usuários que transitavam diariamente pela ponte, ela contou com 32 atenuadores dentro das vigas do vão central da ponte com duas toneladas, cada. (INVENÇÕES BRASILEIRAS,2021)

Esse projeto foi nomeado de Atenuadores Dinâmicos Sincronizados (ADS) e foi desenvolvido e patenteado pelo professor Ronaldo Battista, do programa de engenharia civil da COPPE.

Este sistema solucionou problemas de utilização, onde cerca de 75% das vibrações causadas pelo tráfego foram atenuadas, e até então não houve mais problemas de ressonância com o vento (BATTISTA E PFEIL, 2002 apud SENEM, 2016 p, 11)

Então, o sistema trata-se de caixas de aço presas por molas a uma estrutura metálica (ver figura 3), o ADS entrará em operação no momento que a ponte começar a balançar devido a ressonância causada pela ação do vento sobre a estrutura, ele irá produzir força de controle que irá contrabalançar as forças produzidas pela estrutura (INVENÇÕES BRASILEIRAS,2021).

Figura 3: Protótipo de atenuador do tipo massa-mola.



Fonte: (SEMEM, 2016)

4.4 OUTROS SISTEMAS DE CONTOLES DE OSCILAÇÕES

Além do sistema de controle de oscilação do tipo massa mola, que um dos mais utilizados hoje nas pontes do tipo pênsil existem outros tipos sistemas que tem o mesmo propósito de diminuir vibrações e trazer mais estabilidade e segurança para as construções como edifícios enormes e pontes com maiores vão livres, então as construções ficam mais propicias a alguma ruptura, hoje as pontes precisam estar preparadas para suportar um grande trafego de automóveis e edifícios a serem cada vez mais alto.

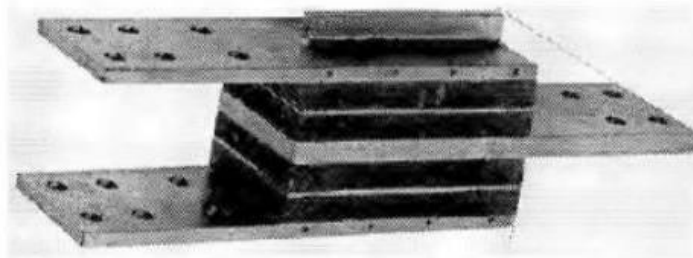
A forte tendência de se projetarem estruturas cada vez mais leves e esbeltas tem levado as edificações a diversos problemas dinâmicos (BARBOSA, 2000), e para sanar tais problemas foram desenvolvidas tecnologias como o de sistema massa mola, visco elásticos e pendulares.

4.1.1 SISTEMAS VISCO-ELÁSTICOS

Os sistemas visco elásticos tem como principal característica a dissipação de energia em forma de calor, conseguindo aumentar o rendimento e proporcionando menos vibrações, isso é possível, aos matérias utilizados que

tem uma propriedade amortecedora, materiais tais como: borracha, resinas e polímeros em geral. (BARBOSA, 2000). Como podemos observar na figura 4.

Figura 4: Amortecedor visco-elástico.



Fonte: (SENEM, 2016)

Esse modelo de amortecedor foi utilizado no World trade center um grande complexo com sete edifícios, em 1969 ele já contava com 1000 amortecedores desse tipo, que eram instalados no banzo inferior das treliças, tinham como objetivo principal diminuir as amplitudes de oscilações devido aos fortes ventos. (BARBOSA, 2000).

4.1. 2 SISTEMAS PENDULARES

O sistema consiste em um pêndulo acoplado a uma estrutura que se espera controlar as vibrações, pode absorver o movimento horizontal, causado por forças inerciais, causadas por oscilações, transferindo assim o deslocamento para o pêndulo, sendo assim, amortecendo as grandes oscilações, (PINHEIRO, 1997).

É um sistema encantador que já foi implantado em alguns dos mais altos edifícios do mundo como: o Taipei 101 possui o maior deles, pesando 660 toneladas. Ele é responsável por reduzir em 60% os efeitos dinâmicos da estrutura, contribuindo para que o empreendimento suporte ventos de até 450 km/h e terremotos de até 7 graus na escala Richter, segundo os projetistas. (BATTISTA E PFEIL, 2002 apud SENEM, 2016 p, 10) podemos observar na figura 5.

Figura 5: Atenuador do tipo pendular instalado do edifício Taipei 101.



Fonte: (SEMEM, 2016)

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, buscamos compreender os efeitos causadores do desmoronamento da ponte *Tacoma Narrows*. Pesquisas mostraram que o causador foram as grandes vibrações provocadas pelos ventos. Sabemos hoje que nessa época não era comum existir sistemas que controlassem tais vibrações. A engenharia atual previne tais situações, são levados em consideração até outros fenômenos naturais, tais como: terremotos e tsunamis. De modo geral, as novas pontes devem satisfazer as considerações do modelo dinâmico, em geral, pontes suspensas e grandes construções.

Observamos, a partir desse trabalho bibliográfico, que se pensarmos hoje com todo o conhecimento adquirido e olharmos para trás podemos falar que foi um grotesco erro de cálculo, porém se levarmos em consideração a falta de conhecimento sobre o fenômeno na época, podemos atribuir esse erro a falta de conhecimento portanto, o fato de desprezar o efeito da ressonância, bem como, os efeitos não lineares atuantes sobre os cabos de sustentação da ponte, culminaram na catástrofe do desmoronamento da ponte. Cientistas, engenheiros civis e até mesmo estudiosos curiosos, ainda hoje, utilizam desses dados, como

exemplo para não repetirem, e buscam o aperfeiçoamento de novas tecnologias, que possam fornecer mais segurança e conforto para os usuários.

Tecnologias que diminuam as vibrações causadas pelas forças dos ventos e conseqüentemente o efeito da ressonância, são valiosos para uma sociedade crescente que buscam construir edifícios, pontes, aviões, navios e dentre outras tecnologias. Talvez, outros estudantes do curso de física possam seguir a proposta fundamental desse trabalho dando continuidade para a compreensão de outros fenômenos, como por exemplo, o Titanic que afundou por falta de conhecimento sobre a natureza dos metais a temperatura baixas ou mesmo, viagem espaciais que exigem o conhecimento sobre lançamento de foguetes. Muitos desastres acontecem e que nos leva a pensar sobre o quanto devemos ser responsáveis sobre aquilo que fazemos. Se pensarmos na área da saúde, quantas cirurgias aconteceram no passado que levaram a morte e que hoje são consideradas simples, rotineiras.

Este simples trabalho de conclusão de curso, nos leva a refletir sobre o quanto a humanidade pode aprender com os erros. É necessário revisar sempre aquilo que fazemos, assim evitamos erros maiores. Por fim, foi através dos erros que conseguimos aperfeiçoar o conhecimento da interação de vento/estrutura sobre pontes de um modo geral.

REFERÊNCIAS

- (1) A. M. Luiz, **A simulation of the Tacoma Narrows Bridge Oscillations** In "The Physics Teacher Simulation Philadelphia, 2000.
- (2) BARBOSA, F. de S. **Modelagem Computacional de Estruturas com Camadas Viscoelásticas Amortecedoras**, Tese de Doutorado, PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000
- (3) CASTRO, Gabriel Gonçalves Pessoa de; BARROSO, Hugo Nascimento; BRASIL JÚNIOR, Júlio César; REIS, Mariana Matos dos; RAMOS, Ylthar; FLORENZANO, Giovanna de Souza. **Erros de cálculo na Engenharia**. Brazilian Journal Of Development. Resende-RJ, p. 27338-27346. nov. 2019.
- (4) CAVALCANTI. **Ponte Tacoma Narrows, 1940 – Um estudo dos efeitos não-lineares** 2015.
- (5) GIL, Armando. Ressonância – Fenômeno Ondulatório. **Blog do Gil**, 18 de abril de 2011. Disponível em: <https://gilarmfi.wordpress.com/2011/04/18/ressonancia-fenomeno-ondulatorio/> acesso em: 07 de abril de 2022.
- (6) LAZER, A. C.; McKENNA, P. J. Large-Amplitude **Periodic Oscillations in Suspension Bridges**: Some New Connections with Nonlinear Analysis. SIAM, Filadélfia. Vol. 32, n. 4, p. 537578, dez, 1990.
- (7) ORO, Neuza T.; BEKEL, Cássia C.; ZEILMANN, Adriano P.. **Simulação do efeito da ressonância através de equações diferenciais: Ponte de Tacoma Narrows**. In: XI EMED - ENCONTRO MINEIRO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS, 2017, Poços de Caldas - MG. Unifal, 2017. p. 1-3.
- (8) PINHEIRO, M. A. S. **Absorção pendular não-linear para redução de vibrações em torres esbeltas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.
- (9) "**Ressonância**" em Só Física. Virtuosa Tecnologia da Informação, 2008-2021. Consultado em 07/09/2021 às 14:19. Disponível na Internet em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatória/Ondas/ressonancia.php>.
- (10) SEARS, F.; YOUNG, H. D. ZEMANSKY, M.W. **Física II**. 12. ed., São Paulo: PEARSON, 2008, v. 2
- (11) SENEM, Felipe. **Controle de Oscilações em Pontes Suspensas com o uso de Atenuadores Maciços Ajustáveis**. 62 páginas. Monografia (Curso

de Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco 2016.C (Graduação)-Curso de Engenharia Civil, Universidade de Tecnologia Federal do Paraná, Pato Branco, 2016

- (12) Sistema de Amortecimento da Ponte Rio Niterói, INVENÇÕES BRASILEIRAS, 2021. Disponível em: <http://www.invencoesbrasileiras.com.br/sistema-de-amortecimento-da-ponte-rio-niteroi/> acesso em: 19 de setembro de 2021.
- (13) SOARES, Roberto A. L. BARBOSA, Fernando R. **O uso de equações diferenciais na justificativa do desabamento da ponte de *Tacoma Narrows***. In: VII CONNEPI- CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, Teresina - PI: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI, 2012 p. 1-