

TEMPLATE DE PRODUÇÃO - MODELO ÁTOMO

Nome da disciplina: Estruturas de Concreto: Pilares e Solicitações Dinâmicas

Conteudista: Afonso Cesar Lelis Brandão

Tabela para uso exclusivo do(a) coordenador(a)

Requisitos para um conteúdo UAU Observações

Conformidade com o Plano de Aprendizado

Clareza e objetividade

Ortografia e gramática

Recursos visuais atrativos (imagens, gifs, etc.)

Data da Validação Nome do(a) Coordenador(a) do curso

● VALIDADO ● NÃO VALIDADO ● CANCELADO

TEXTO BASE -

TÍTULOS E OBJETIVOS DAS VIDEOAULAS -

QUIZ -

MATERIAL COMPLEMENTAR -

TEXTO BASE

Por que essa disciplina é relevante para a sua atuação profissional? Esta disciplina é de extrema relevância para a engenharia civil moderna, pois capacita o profissional a projetar estruturas que não apenas suportam cargas estáticas (peso próprio, ocupação), mas também resistem com segurança e desempenho a ações dinâmicas. Cargas como ventos, sismos, vibrações de máquinas e até o tráfego de pessoas ou veículos impõem desafios complexos que, se não forem devidamente considerados, podem levar a falhas estruturais catastróficas ou a um desconforto inaceitável para os usuários. Compreender o comportamento dinâmico permite a criação de edificações mais seguras, resilientes, econômicas e confortáveis, alinhadas às exigências de normas técnicas e aos desafios de um ambiente construído cada vez mais ousado e complexo.

Contribuições para a Atuação Profissional

- **Segurança e Resiliência Estrutural:** Capacidade de analisar e dimensionar estruturas para resistir a terremotos e rajadas de vento, garantindo a estabilidade e a vida útil da edificação.
- **Projetos Otimizados e Econômicos:** Domínio de conceitos como períodos de vibração e amortecimento, permitindo a especificação de sistemas estruturais e dispositivos de controle que otimizam o uso de materiais.
- **Análise de Desempenho e Conforto:** Habilidade para avaliar e mitigar vibrações em pisos de academias, passarelas e edifícios industriais, assegurando o conforto dos usuários e o bom funcionamento de equipamentos sensíveis.
- **Diagnóstico e Reforço Estrutural:** Competência para diagnosticar patologias causadas por fadiga ou ressonância e projetar soluções de reforço para estruturas existentes.

Exemplos Práticos

- Projeto de edifícios altos em zonas sísmicas ou com forte incidência de ventos.
 - Verificação de vibrações em lajes de hospitais que abrigam equipamentos de ressonância magnética ou em edifícios comerciais com academias.
 - Dimensionamento de fundações para máquinas industriais de grande porte (prensas, geradores) para isolar a vibração.
 - Análise dinâmica de pontes e passarelas para verificar os efeitos da ressonância induzida pelo caminhar de pedestres.
-

TEXTO BASE EXPANDINDO HORIZONTES DA VIDEOAULA 1

Aula 1 - Fundamentos das Vibrações Estruturais

1. Introdução: Cargas Estáticas vs. Dinâmicas Em engenharia de estruturas, tradicionalmente lidamos com **cargas estáticas**, que são aplicadas de forma lenta e gradual, como o peso próprio da estrutura ou a mobília em um edifício. No entanto, muitas ações importantes são **dinâmicas**: sua magnitude, direção ou ponto de aplicação variam rapidamente no tempo. Exemplos incluem ventos, sismos, explosões e vibrações de máquinas.

Pêndulo de Newton ilustrando impactos (carga dinâmica)

Figure 1: Pêndulo de Newton ilustrando impactos (carga dinâmica)

A principal diferença é que cargas dinâmicas geram **forças de inércia** (lembre-se da Segunda Lei de Newton, $F=ma$), que se opõem à aceleração e alteram completamente a resposta da estrutura.

2. O Modelo Fundamental: Sistema Massa-Mola-Amortecedor

Para entender o comportamento dinâmico, simplificamos uma estrutura complexa em um modelo com um único grau de liberdade (1 GDL).

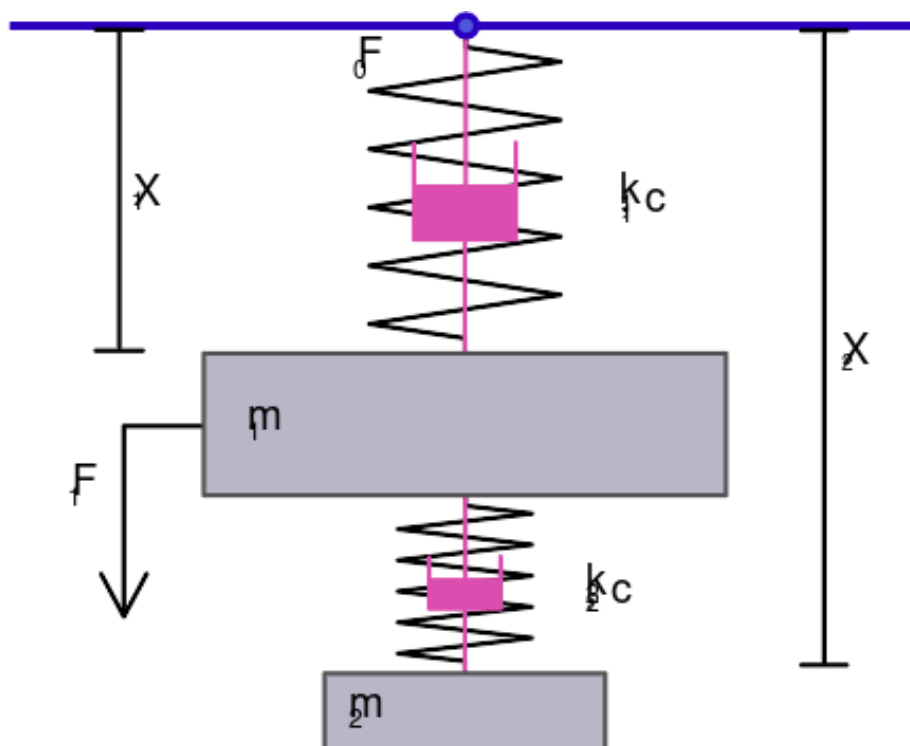


Figure 2: Diagrama clássico massa-mola-amortecedor

Este modelo é composto por três elementos:

- **Massa (M):** Representa a inércia da estrutura. Em um edifício, seria a massa concentrada no nível do pavimento.
- **Mola (Rigidez, k):** Representa a capacidade da estrutura de resistir à deformação. Em um pórtico, seria a rigidez lateral combinada dos pilares.
- **Amortecedor (Amortecimento, c):** Representa a dissipação de energia da estrutura, que faz com que a vibração diminua e pare. Ocorre por atrito interno no material, interação com elementos não estruturais, etc.

3. Vibração Livre Não Amortecida: A Essência da Estrutura

Vamos analisar o caso mais simples: uma estrutura que é deslocada de sua posição de equilíbrio e solta, sem a ação de forças externas e sem amortecimento ($c=0$). Ela oscilará perpetuamente em um movimento harmônico simples.

Dois parâmetros fundamentais governam esse movimento:

- **Frequência Natural (ω_n):** É a frequência na qual o sistema “prefere” vibrar. Depende apenas da rigidez e da massa. Uma estrutura mais rígida vibra mais rápido, enquanto uma mais pesada vibra mais devagar. $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}$ (rad/s)
- **Período Natural (T_n):** É o tempo que a estrutura leva para completar um ciclo de vibração. É o inverso da frequência.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (s)$$

O período natural é o “DNA” dinâmico de uma estrutura. Um arranha-céu tem um período longo (vários segundos), enquanto uma estrutura baixa e rígida tem um período curto (frações de segundo).

4. Vibração Livre Amortecida: O Comportamento Real Na realidade, toda estrutura dissipa energia. O amortecimento faz com que a amplitude da vibração livre diminua com o tempo. A forma como isso acontece depende da **taxa de amortecimento (ζ)**, um valor adimensional que compara o amortecimento real do sistema com o “amortecimento crítico”.

- **Amortecimento Subcrítico ($\zeta < 1$):** O sistema oscila, mas com amplitude decrescente até parar. Este é o caso de 99% das estruturas de engenharia civil.
- **Amortecimento Crítico ($\zeta = 1$):** O sistema retorna à posição de equilíbrio o mais rápido possível, sem oscilar.
- **Amortecimento Supercrítico ($\zeta > 1$):** O sistema retorna à posição de equilíbrio lentamente, sem oscilar (ex: um amortecedor de porta).

5. Pontos-Chave da Aula

1. Cargas dinâmicas geram forças de inércia que são cruciais na análise.
2. O comportamento dinâmico pode ser entendido pelo modelo simplificado **massa-mola-amortecedor**.
3. Toda estrutura possui uma **frequência natural (ω_n)** e um **período natural (T_n)**, que dependem apenas de sua massa e rigidez.

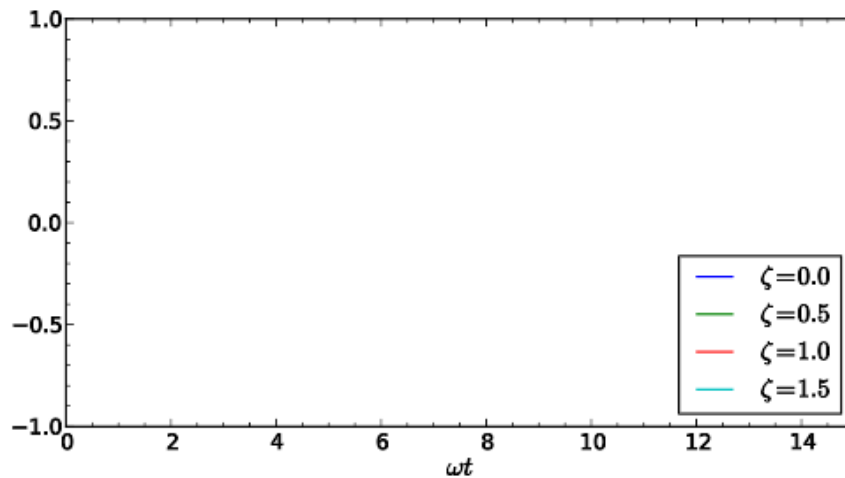


Figure 3: Regimes de amortecimento: subcrítico, crítico e supercrítico

4. O **amortecimento (ζ)** é a propriedade que dissipa a energia de vibração.

6. Preparação para a Próxima Aula Na próxima aula, investigaremos o que acontece quando uma força externa contínua atua sobre a estrutura, introduzindo o conceito de **vibração forçada** e o perigoso fenômeno da **ressonância**.

VIDEOAULA 1: Aula 1 - Fundamentos das Vibrações Estruturais

Roteiro para a Videoaula 1 - Fundamentos das Vibrações Estruturais

(1) Abertura (1 min) * *Professor na tela:* “Olá! O que uma ponte, um arranha-céu e um violão têm em comum? Todos eles vibram! E entender como eles vibram é o que nos permite projetá-los com segurança. Sou Afonso Cesar Lelis Brandão e hoje vamos mergulhar nos fundamentos das vibrações estruturais.”

(2) O que Torna uma Carga “Dinâmica”? (2 min) * *Animção:* Mostrar um bloco sobre uma mola. Primeiro, uma mão empurra o bloco lentamente (carga estática, só há deformação). Depois, a mão

dá um toque rápido no bloco (carga dinâmica, o bloco oscila). * *Professor*: “A diferença é a **aceleração**. Se a carga causa aceleração, ela gera forças de inércia, e a análise muda completamente. É a diferença entre estacionar um carro na garagem e... bem, bater o carro na parede da garagem.”

(3) O Trio Dinâmico: Massa, Mola e Amortecedor (3 min) * *Animação 3D de um pórtico simples*: A laje se transforma no bloco de **Massa (M)**. Os pilares se transformam em **Molas (k)**. E um pistão de **Amortecedor (c)** aparece ao lado. * *Professor*: “Podemos simplificar qualquer estrutura neste trio. A massa é o peso, a rigidez é a resistência dos pilares, e o amortecimento é o ‘freio’ natural que dissipa a energia.”

(4) A Identidade da Estrutura: Período Natural (4 min) * *Demonstração prática*: Pegar uma régua, prender na mesa e tocá-la para vibrar. “Vejam, ela vibra em uma velocidade própria. Esse é seu **período natural**.” * *Animação na tela*: Mostrar a fórmula $T_n = 2 \cdot \sqrt{M/k}$. * *Professor*: “É simples: se eu colocar mais massa na ponta da régua [colocar um clipe], ela vibra mais devagar. Período maior. Se eu encurtar a régua [torná-la mais rígida], ela vibra mais rápido. Período menor. Cada prédio tem seu próprio período natural!”

(5) O Freio: Amortecimento (2 min) * *Vídeo ou animação*: Mostrar uma porta de shopping com amortecedor (exemplo de amortecimento subcrítico, ela oscila um pouco). * *Professor*: “Na vida real, a vibração não dura para sempre. O amortecimento, mesmo que pequeno, a dissipa. Em estruturas de concreto, ele é baixo, em torno de 2% a 5%.”

(6) Encerramento e Próxima Aula (1 min) * *Professor*: “Resumindo: hoje vimos os 3 ingredientes de uma vibração (massa, rigidez, amortecimento) e aprendemos o conceito mais importante: o período natural. Na próxima aula, vamos descobrir o que acontece quando uma força externa ‘empurra’ a estrutura no seu ritmo preferido. Preparem-se para o fenômeno da **ressonância**.”

Links Suplementares da Aula 1

- Harmonic oscillator (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Harmonic_oscillator
- Damping (Wikipedia): <https://en.wikipedia.org/wiki/Damping>
- Mass-spring-damper model (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Mass%E2%80%93spring-damper_model

TEXTO BASE EXPANDINDO HORIZONTES DA VIDEOAULA 2

Aula 2 - Excitação Harmônica, Ressonância e Amortecimento

1. Força Dinâmica Harmônica: conceito e equação de movimento Quando uma estrutura sofre a ação de uma força que varia no tempo de forma periódica, dizemos que está sob excitação harmônica. Para um sistema de 1 GDL, a equação diferencial é:

$$M \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) = p_0 \sin(\omega t)$$

onde M é a massa equivalente, c o amortecimento viscoso, k a rigidez, p_0 a amplitude da força e ω a frequência de excitação.

Definimos ainda: - Frequência natural: $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}$ e $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$ - Razão de amortecimento: $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{kM}}$ - Razão de frequência: $r = \frac{\omega}{\omega_n}$

2. Resposta em regime permanente e fator de amplificação A resposta após o transitório é harmônica com a mesma frequência da excitação, mas com amplitude e fase diferentes. A amplitude U do deslocamento em regime permanente é:

$$U = \frac{p_0/k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \Rightarrow \text{FA} = \frac{U}{p_0/k}$$

O ângulo de fase φ entre a força e o deslocamento é:

$$\tan \varphi = \frac{2\zeta r}{1-r^2}$$

Observações práticas em estruturas de concreto: - Para $r \ll 1$, o comportamento é quase estático (FA ≈ 1). - Perto de $r = 1$ (ressonância), o amortecimento controla a amplitude. Em concreto armado, ζ típico está entre 2% e 5%. - Para $r \gg 1$, o deslocamento decai, mas a resposta de aceleração pode crescer.

3. Exemplo numérico aplicado Considere um pórtico representado por $M = 10\,000$ kg, $k = 2 \times 10^7$ N/m e $\zeta = 5\%$. Uma força dinâmica $p_0 = 10\,000$ N atua com $\omega = \omega_n$.

- $\omega_n = \sqrt{k/M} = \sqrt{2 \times 10^7 / 10^4} = \sqrt{2000} \approx 44,72$ rad/s, $f_n \approx 7,12$ Hz
- Em ressonância ($r = 1$), $\text{FA} = \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{0,10} = 10$
- Deslocamento estático $= p_0/k = 10,000 / 2 \times 10^7 = 5 \times 10^{-4}$ m
- Deslocamento dinâmico $U = 10 \times 5 \times 10^{-4} = 5 \times 10^{-3}$ m = 5 mm

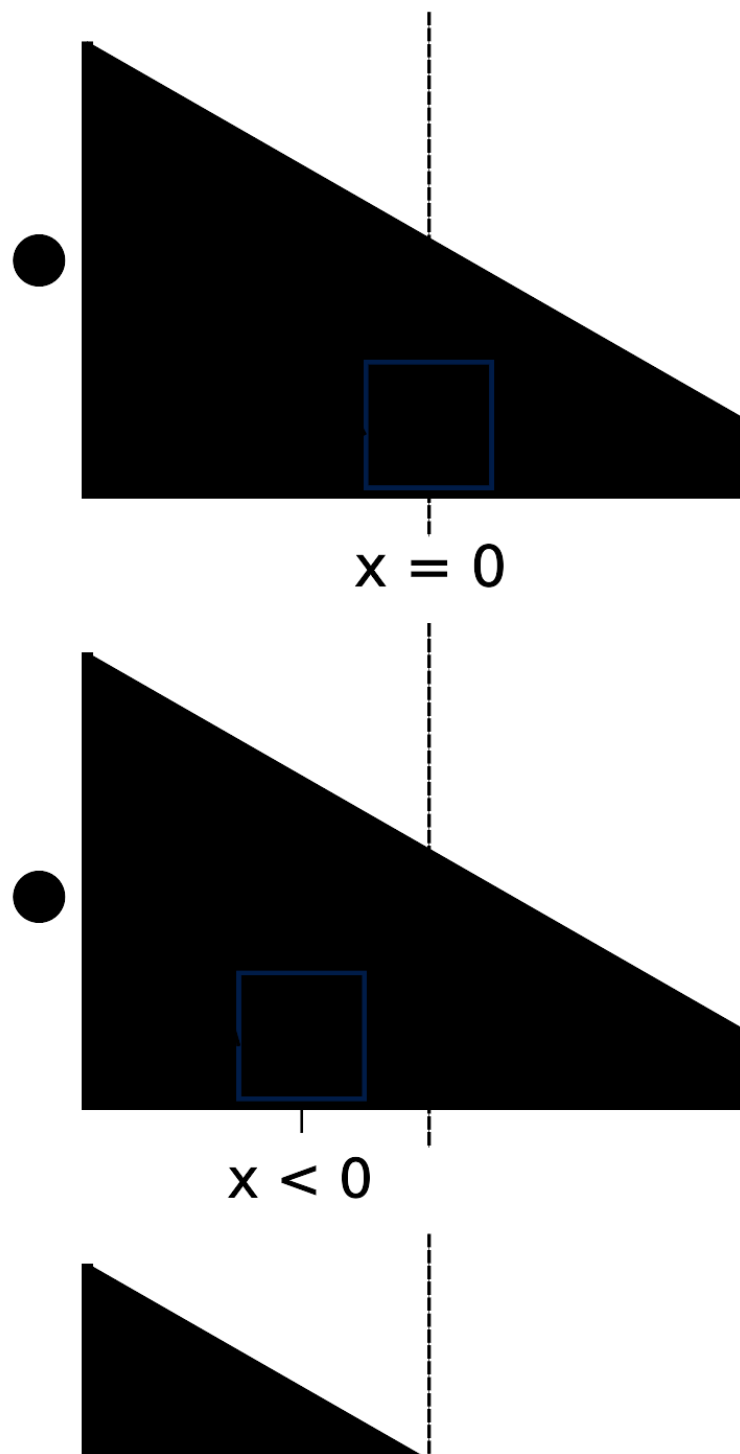


Figure 4: Oscilador harmônico sob força senoidal

Conclusão: um leve amortecimento limita a amplitude, mas perto da ressonância ainda ocorrem deslocamentos significativamente maiores que os estáticos.

4. Excitação por base (sismos e máquinas) Quando a base se move, como em um sismo, a entrada é um deslocamento de base $y(t)$ e a variável de interesse é o deslocamento relativo $u_r(t)$ da massa em relação à base.

$$M \ddot{u}_r + c \dot{u}_r + k u_r = -M \ddot{y}(t)$$

Ideias-chave: - Em análise sísmica, trabalhamos com espectros de resposta (deslocamento, velocidade, pseudo-aceleração). O pico de pseudo-aceleração S_a aproxima a força inercial máxima $F_{in} \approx M S_a$. - Para máquinas, isoladores (molas e amortecedores) são projetados para operar com $r > \sqrt{2}$ visando reduzir transmissibilidade de forças ao apoio.

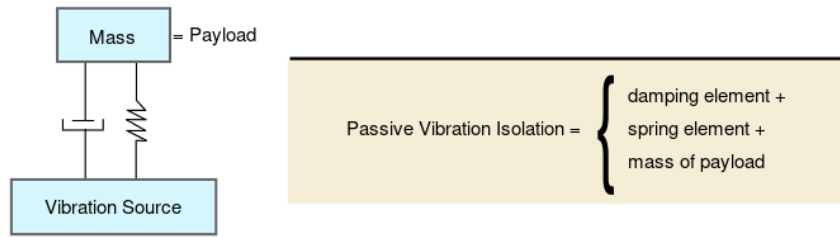


Figure 5: Esquema de isolamento/base excitada

5. Vento, desprendimento de vórtices e pilares esbeltos Além de rajadas aleatórias, o vento pode induzir vibrações por desprendimento periódico de vórtices. A frequência de shedding f_s é estimada por $f_s = St \frac{U}{D}$, com $St \approx 0,2$ para seções circulares, U a velocidade do vento e D a dimensão característica. Evite $f_s \approx f_n$ para não excitar ressonância transversal em pilares e mastros.

Medidas de projeto: - Ajustar rigidez e massa para deslocar f_n . - Aumentar amortecimento com dispositivos ou detalhes construtivos. - Usar chanfros, aletas ou rugosidade para alterar o escoamento e reduzir St efetivo.

6. Boas práticas e checklist de projeto

- Identificar ω_n , ζ e principais fontes de excitação (sismo, vento, máquinas, tráfego).
- Verificar razão r para cenários críticos; se $r \approx 1$, avaliar FA e respostas de deslocamento/aceleração.
- Para equipamentos sensíveis, checar transmissibilidade e adotar isolamento quando necessário.
- Considerar limites de conforto ao invés de apenas resistência (vibração de pisos, passarelas, escritórios).

7. Atividade prática sugerida Monte no software de sua escolha (ou planilha) um modelo 1 GDL. Varie ζ de 0 a 10% e trace a curva do fator de amplificação $FA(r)$. Discuta como o pico muda com o amortecimento e relacione com sistemas reais de concreto.

8. Pontos-chave

- A ressonância ocorre quando $\omega \approx \omega_n$ e o amortecimento controla a amplitude máxima.
- Excitação por base (sísmica) acopla a resposta à aceleração do terreno; o uso de espectros facilita o dimensionamento.
- Em pilares esbeltos, verificar efeitos de vento e shedding para evitar vibrações excessivas e fadiga.

VIDEOAULA 2: Aula 2 - Ressonância e Excitação Harmônica em Estruturas de Concreto

Ressonância e Excitação Harmônica em Estruturas de Concreto

Tempo total estimado: 15 minutos

1) Abertura e retomada (1 min)

- Professor: “Sou Afonso Cesar Lelis Brandão. Hoje vamos entender como forças periódicas interagem com o período natural da estrutura e por que a ressonância é tão crítica.”

2) Conceito de excitação harmônica (2 min)

- Slide: Equação $M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \sin(\omega t)$ e definições de ω_n , ζ , r .
- Demonstração: régua ou mola com massa para ilustrar força periódica.

3) Fator de amplificação e fase (4 min)

- Gráfico: $FA(r)$ para $\zeta = 0\%, 2\%, 5\%$.
- Explicar por que deslocamento, velocidade e aceleração têm picos em regiões de r distintas.

4) Exemplo numérico (3 min)

- Cálculo guiado do exemplo do texto: $U = 5$ mm em ressonância com $\zeta = 5\%$.
- Mensagem: pequenos amortecimentos já evitam amplitudes teoricamente infinitas.

5) Excitação por base e espectros (3 min)

- Quadro: $M\ddot{u}_r + c\dot{u}_r + ku_r = -M\ddot{y}(t)$, ideia de espectros S_d, S_v, S_a .
- Aplicação: como isso se traduz em forças inerciais de projeto.

6) Encerramento (2 min)

- Checklist de projeto. Gancho para próxima aula: “Como analisar vibrações em sistemas multi-grau (pórticos) e evitar problemas de conforto e fadiga?”

Links Suplementares da Aula 2

- Forced vibration (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Forced_vibration
 - Resonance (Wikipedia): <https://en.wikipedia.org/wiki/Resonance>
 - Response spectrum (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Response_spectrum
-

TEXTO BASE EXPANDINDO HORIZONTES DA VIDEOAULA 3

Aula 3 - Sistemas de Múltiplos Graus de Liberdade (MGL): Análise Modal e Superposição

1. Equações de movimento em forma matricial Estruturas reais (pórticos, treliças, lajes) possuem vários graus de liberdade. No domínio linear, modelamos como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{p}(t)$$

onde \mathbf{M} é a matriz de massa, \mathbf{C} a matriz de amortecimento, \mathbf{K} a matriz de rigidez e $\mathbf{u}(t)$ o vetor de deslocamentos generalizados.

2. Autovalores e autovetores: modos próprios Desprezando o amortecimento para a análise modal clássica ($\mathbf{C} = \mathbf{0}$) e assumindo solução livre $\mathbf{u}(t) = \phi e^{i\omega t}$, obtemos o problema de autovalor generalizado:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \phi = \mathbf{0}$$

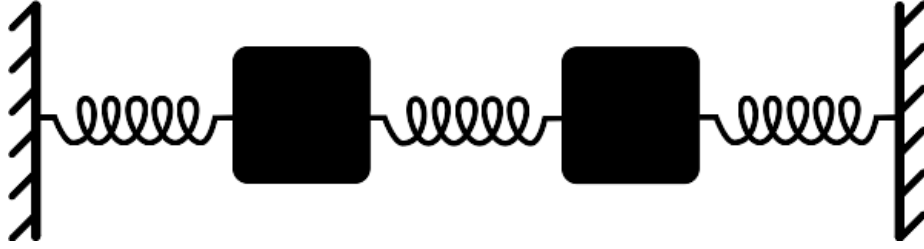


Figure 6: Osciladores acoplados (MGL) - diagrama conceitual

Cada autovalor ω_n^2 produz uma frequência natural ω_n e um autovetor $\phi^{(n)}$ (forma modal). Propriedades úteis: - Ortogonalidade com massa: $\phi^{(m)T} \mathbf{M} \phi^{(n)} = 0$ para $m \neq n$. - Ortogonalidade com rigidez: $\phi^{(m)T} \mathbf{K} \phi^{(n)} = 0$ para $m \neq n$. - Normalização por massa unitária: escolher $\phi^{(n)T} \mathbf{M} \phi^{(n)} = 1$.

Visualmente, formas modais representam “padrões” de vibração. Exemplos ilustrativos:

Modos de vibração de uma membrana (analogia visual)

Figure 7: Modos de vibração de uma membrana (analogia visual)

3. Coordenadas modais, fatores de participação e massas modais

Expandir a resposta como combinação dos modos:

$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N \phi^{(n)} q_n(t)$. Substituindo nas equações e usando ortogonalidade, desacoplamos o sistema em N EDOs escalares para as coordenadas modais $q_n(t)$.

Fator de participação Γ_n mede o quanto a excitação generalizada “projeta” no modo n . A massa modal efetiva associada indica a fração de massa total mobilizada por cada modo. Na prática, escolhemos modos até acumular, por exemplo, >90% de massa efetiva em cada direção.

4. Superposição modal e truncamento; combinações

SRSS/CQC Após obter $q_n(t)$ (por resposta harmônica, espectral ou histórico temporal), reconstruímos $\mathbf{u}(t)$ por superposição. Para esforços solicitantes no domínio sísmico (espectro elástico), combina-se contribuições modais via: - SRSS (square root of sum of squares), adequado para modos bem separados. - CQC (complete

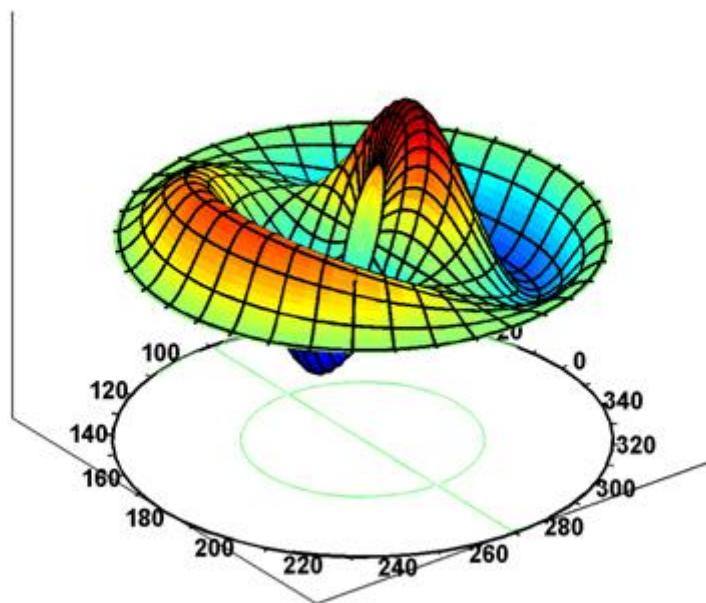


Figure 8: Forma modal de prato circular com linhas nodais

Viga em balanço excitada no modo 2 (exemplo)

Figure 9: Viga em balanço excitada no modo 2 (exemplo)

quadratic combination), mais acurado quando há acoplamento/atrito modal por frequências próximas e amortecimento.

Referência visual para espectros de resposta (sísmico):

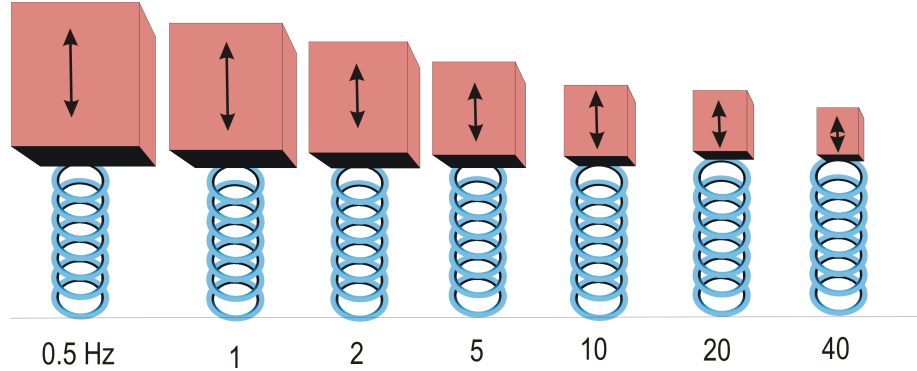


Figure 10: Exemplo de espectro de resposta - deslocamento/velocidade/aceleração

5. Exemplo numérico resumido (2 GDL) Considere um sistema de 2 massas ligadas por molas (como no diagrama de osciladores acoplados). Dados $\mathbf{M} = \text{diag}(m, m)$ e $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}$. Resolva $\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0$ para obter ω_1, ω_2 e os vetores $\phi^{(1)}, \phi^{(2)}$. Em seguida, normalize por massa e calcule Γ_n para uma excitação uniforme $\mathbf{p}(t) = [p \ p]^T \sin \omega t$.

Discussão: o primeiro modo tem massas em fase; o segundo, fora de fase. A excitação “uniforme” tende a participar mais do primeiro modo.

6. Conforto em pisos e diretrizes práticas Além de verificação de resistência, verifique vibração e conforto (aceleração RMS, faixas de frequência) conforme normas e guias de projeto. Em pavimentos de concreto com academias ou escritórios, garanta frequência natural fora das faixas críticas de atividade e avalie amortecimento adicional via elementos não estruturais.

Checklist rápido: - Extraia $\omega_n, \phi^{(n)}, \Gamma_n$ e massas modais efetivas. - Trunque quando a massa efetiva acumulada for suficiente para o fenômeno de interesse. - Em análise sísmica, use espectro de projeto e combine por SRSS/CQC. - Para vento/maquinário, cheque transmissibilidade e evite coincidência $f_{\text{força}} \approx f_n$ relevante.

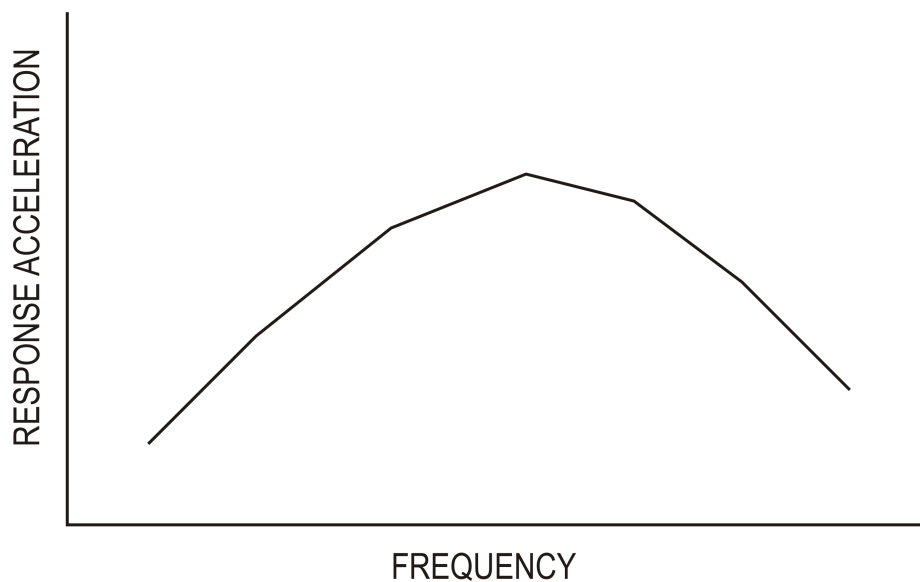


Figure 11: Curvas espectrais complementares

7. Atividade prática sugerida Modele um pórtico 2D simples (2 a 4 GDL) e extraia as duas primeiras frequências e formas modais. Calcule fatores de participação para uma excitação lateral uniforme e estime deslocamento de topo via superposição usando um espectro simplificado.

8. Pontos-chave

- MGL se resolvem eficientemente por análise modal; modos de-sacoplam a dinâmica.
- Fatores de participação e massas modais guiam truncamento e interpretação física.
- SRSS/CQC são essenciais para combinar respostas modais sob excitação sísmica.

VIDEOAULA 3: Aula 3 - Análise Modal em Múltiplos Graus de Liberdade e Superposição Análise Modal em Múltiplos Graus de Liberdade e Superposição

Tempo total estimado: 15-18 minutos

- 1) Abertura e objetivo (1 min)

- Professor: “Sou Afonso Cesar Lelis Brandão. Hoje vamos entender como decompor estruturas reais em modos e combinar suas respostas com segurança.”
- 2) Equações matriciais e ideia de acoplamento (3 min)
- Slide: $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{p}(t)$; diagrama de osciladores acoplados.
 - Imagem: osciladores acoplados - https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Coupled_oscillators.png
- 3) Modos próprios e visualização (4 min)
- Mostrar GIFs/imagens de formas modais: membrana, prato circular, viga em balanço (modos superiores).
 - Imagens:
 - https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/Drum_vibration_mode12.gif
 - https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cc/Mode_Shape_of_a_Round_Plate.gif
 - https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cb/Beam_mode_6.gif
- 4) Coordenadas modais, participação e truncamento (4-5 min)
- Quadro: $\mathbf{u} = \sum \phi^{(n)} q_n(t)$; definição de Γ_n e massa modal.
 - Regra prática: acumular >90% de massa efetiva; comentar amortecimento modal proporcional.
- 5) Espectro e combinações SRSS/CQC (3-4 min)
- Imagens: espectro de resposta (deslocamento/velocidade/aceleração).
 - Links:
 - <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e7/Eqresp1.png>
 - <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e2/Eqresp2.png>
- 6) Encerramento e gancho (1 min)
- Professor: “Na próxima, aplicaremos esses conceitos em pilares esbeltos sob ações reais, amarrando critérios de conforto e desempenho estrutural.”

####

Links

Su-
ple-
mentares
da

Aula

3 -

Modal

anal-

ysis

(Wikipedia):

https://en.wikipedia.org/wiki/Modal_analysis

-

Rayleigh-

Ritz

method

(Wikipedia):

https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh%E2%80%93Ritz_method

-

Euler-

Bernoulli

beam

the-

ory

(Wikipedia):

https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli_beam_theory

####

TEXTO

BASE

EX-

PANDINDO

HOR-

I-

ZONTES

DA

VIDEOAULA

4

Aula
4 -
Amortec-
i-
mento,
Trans-
mis-
si-
bili-
dade
e
Con-
t-
role
de
Vi-
brações
em
Pi-
lares

####

1.

Amortec-

i-

mento:

pa-

pel

físico

e

efeito

na

ressonân-

cia

O

amortec-

i-

mento

dis-

sipa

en-

er-

gia

e

limita

am-

pli-

tudes,

es-

pe-

cial-

mente

perto

da

ressonân-

cia.

Em

con-

creto

ar-

mado,

amortec-

i-

men-

tos

equiv-

a-

lentes

tipi-

cos

(es-

tru-

tu-

rais)

variam

en-

Visualização
de
como
o
amortec-
i-
mento
al-
tera
o
pico
de
ressonân-
cia:



####

2.

Trans-

mis-

si-

bili-

dade

e

iso-

lação

de

vi-

brações

Trans-

mis-

si-

bili-

dade

(T)

é a

razão

en-

tre

a

re-

sposta

trans-

mi-

tida

ao

apoio

e a

ex-

ci-

tação.

Para

um

sis-

tema

massa-

mola-

amortecedor

sub-

metido

a

base

vi-

bratória,

há

três

regiões:

- r

< 1:

região

de

Referência

vi-
sual
de
es-
quema
de
iso-
la-
mento
e
cur-
vas
típi-
cas:



####

3.

Vento

em

pi-

lares

es-

bel-

tos

e

de-

sprendi-

mento

de

vór-

tices

Pi-

lares/mastros

es-

bel-

tos

po-

dem

sofrer

vi-

bração

transver-

sal

por

de-

sprendi-

mento

per-

iódico

de

vór-

tices.

A

fre-

quên-

cia

car-

ac-

terís-

tica

pode

ser

es²³

ti-

mada

por

$f_s =$

$St \frac{U}{D},$

com

$St \approx$

Animações
e
im-
a-
gens
didáti-
cas
de
rua
de
vór-
tices:
Animação
de
rua
de
vór-
tices
de
Kár-
mán
-
link

####

4.

Es-
traté-
gias

de

con-

t-

role:

au-

men-

tar

ç,

deslo-

car

f_n,

de-

sacoplar

a

ex-

ci-

tação

-

Au-

men-

tar

amortec-

i-

mento

efe-

tivo:

dis-

pos-

i-

tivos

como

TMD

(tuned

mass

damper)

e

par-

tici-

pação

de

ele-

men-

tões

não

es-

tru-

tu-

rais.

-

Deslo-

Exemplos
vi-
suais
de
soluções:
Tuned
Mass
Damper
do
Taipei
101

-
link
Isoladores
de
base
in-
sta-
la-
dos
(ex-
em-
plo
real)
-
link

####

5.

Di-
re-
trizes
práti-
cas
para
pi-
lares
de
con-
creto

-

Ver-
i-
ficar
es-
bel-
tez
e
fre-
quên-
cias
nat-
u-
rais
(modo
transver-
sal
pre-
dom-
i-
nante)
e
com-
parar
com
faixas
de
vento
dom-
i-
nante
e
ativi-
dades
i²⁷
ter-
nas.

-

Con-
sid-
erar
amortec-

####

6.

Atividade
prática

sugerida

Para

um

pi-
lar

iso-
lado

mod-

e-

lado

como

viga

engastada-

livre,

es-

time

f_n

do

primeiro

modo

a

par-

tir

de

EI

e

m

lin-

eares.

Com

U

de

vento

es-

ti-

mado,

cal-

cule

f_s

por

Strouhal

28

dis-

cuta

risco

de

co-

in-

cidên-

####

7.

Pon-
tos-chave

-

Amortec-

i-

mento

con-

trola

pi-

cos

de

re-

sposta

e

mel-

hora

con-

forto.

-

Trans-

mis-

si-

bili-

dade

ori-

enta

o

pro-

jeto

de

iso-

la-

mento;

$r > \sqrt{2}$

fa-

vorece

iso-

lação.

-

Em

pi-

lares

es-

bel-

tos,

mit-

i-

gar

de-

sprendi-

mento

de

vór-

VIDEOAULA 4: Aula 4 - Amortecimento, Transmissibilidade e Controle de Vibrações em Pilares Amortecimento, Transmissibilidade e Controle de Vibrações em Pilares

Tempo total estimado: 15-18 minutos

1) Abertura (1 min)

- Professor: “Sou Afonso Cesar Lelis Brandão. Vamos ligar conceitos de ressonância a medidas de projeto: amortecimento, transmissibilidade e controle em pilares.”

2) Amortecimento e pico de ressonância (3-4 min)

- Slide: efeito de ζ no pico; imagem da envoltória de ressonância.
- Link: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Mplwp_resonance_zeta_envelope.png

3) Transmissibilidade e isolamento (4 min)

- Quadro: regiões $r < 1$, $r \approx \sqrt{2}$, $r > \sqrt{2}$; trade-off de ζ .
- Imagens: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Passvib1.svg> e https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8f/Harmonic_oscillator_gain.svg

4) Vento e vórtices em pilares (3-4 min)

- Conceito de shedding e Strouhal; riscos de fadiga e conforto.
- Animação: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/Vortex-street-animation.gif>

5) Soluções de controle (3-4 min)

- Exemplos: TMD (Taipei 101) e isoladores de base.
- Imagens: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/15/Taipei_101_Tuned_Mass_Damper.jpg e https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/de/Base_isolators_under_the_Utah_Salt_Lake_Center.jpg

6) Encerramento (1 min)

- Professor: “Na sequência, integramos os conceitos em estudos de caso e checklist de verificação para projeto de pilares em concreto sob ações dinâmicas reais.”

####

Links

Su-
ple-
mentares

da

Aula

4 -

Vi-

bra-

tion

iso-

la-

tion

(Wikipedia):

https://en.wikipedia.org/wiki/Vibration_isolation

-

Tuned

mass

damper

(Wikipedia):

https://en.wikipedia.org/wiki/Tuned_mass_damper

-

Vor-

tex

shed-

ding

(Wikipedia):

https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_shedding

#

AVALI-

AÇÕES

##

Quiz

Não

Avalia-

tivo

(V/F)

1)
Em
um
sis-
tema
sem
amortec-
i-
mento,
sob
ex-
ci-
tação
har-
mônica
com
razão
de
fre-
quên-
cia
 $r=1$,
a
am-
pli-
tude
teórica
de
deslo-
ca-
mento
tende
ao
in-
finito.
- Re-
sposta
cor-
reta:
Ver-
dadeiro
- Ex-
pli-
cação:
Para
 $\zeta=0$
e
 $r=1$,
o
fa-
tor
de
am-
pli-
fi-

2)
Para
garan-
tir
iso-
lação
vi-
bratória,
basta
op-
erar
com
 $r > 1$,
in-
de-
pen-
den-
te-
mente
do
amortec-
i-
mento.
- Re-
sposta
cor-
reta:
Falso
- Ex-
pli-
cação:
A
região
efe-
tiva
de
iso-
lação
ocorre
tipi-
ca-
mente
para
 $r > \sqrt{2}$;
o
amortec-
i-
mento
33
in-
flu-
en-
cia
a
trans-
mis-

Atividade
Verifi-
cadora
(Disser-
ta-
tiva)

—
-

Questão:
Con-
sidere
um
pi-
lar
es-
belto
mod-
e-
lado
como
viga
engastada-
livre
com
fre-
quên-
cia
nat-
u-
ral
fun-
da-
men-
tal
f_n. Em
um
am-
bi-
ente
com
vento
mé-
dio
U,
es-
time
a
fre-
quên-
cia
de
de-
sprendi-
mento
de
vór-
tices
 $f_s = St \cdot U/D$
e
dis-
cuta
o

MATERIAL COMPLEMENTAR

Direto da Fonte

- Texto provocativo: Aprofunde a base teórica dos modelos de 1 e múltiplos GDL e conecte com análise espectral sísmica antes de dimensionar os pilares.
- Livro: Dinâmica de Estruturas (Anil K. Chopra)
- Capítulos: 1-3 (conceitos básicos, SDOF, MDOF) e capítulo sobre espectros de resposta
- Link: <https://biblioteca-a.read.garden/viewer/9786556901633/91>
- Acesso: plataforma Brightspace (BV Professor) – usuário: professor.conteudista – senha: unifecaf2023

Para Mergulhar

- Filme: Dream Big – Engineering Our World (2017). Uma visão inspiradora do impacto da engenharia nas cidades e estruturas.
- Série: Megastructures – Taipei 101. Episódio com foco em controle de vibrações e TMD.
- Livro: BLEVINS, R. D. Flow-Induced Vibration. 2. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. Excelente referência para vibrações induzidas por escoamento.
- Blog: Practical Engineering – conteúdos acessíveis sobre engenharia de estruturas e dinâmica. Link: <https://practical.engineering/blog>

Podcast

- Texto provocativo: Ouça uma conversa prática sobre vibrações em estruturas reais e critérios de conforto.
- Podcast/Vídeo: Acoplando Ideias
- Episódio: VIBRAÇÃO MECÂNICA: O FANTASMA DAS INDÚSTRIAS
- Link: <https://www.youtube.com/watch?v=j-sA4L2w-3E>

Artigo Científico

- Texto provocativo: Panorama do controle estrutural e do uso de amortecedores ajustados em edifícios altos.
- Link: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:9\(897\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:9(897))
- Referência ABNT: HOUSNER, G. W.; et al. Structural control: past, present, and future. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, v. 123, n. 9, p. 897-971, 1997.

Referências

- Harmonic oscillator (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Harmonic_oscillator
- Damping (Wikipedia): <https://en.wikipedia.org/wiki/Damping>
- Mass-spring-damper model (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Mass%E2%80%93spring-damper_model
- Forced vibration (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Forced_vibration
- Resonance (Wikipedia): <https://en.wikipedia.org/wiki/Resonance>
- Response spectrum (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Response_spectrum
- Modal analysis (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Modal_analysis
- Euler-Bernoulli beam theory (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli_beam_theory
- Vibration isolation (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Vibration_isolation
- Tuned mass damper (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Tuned_mass_damper
- Kármán vortex street (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_vortex_street
- Vortex shedding (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_shedding

Imagens citadas (Commons/Wikipedia): - Drum vibration mode (GIF): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Drum_vibration_mode12.gif
- Mode shape of a round plate: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mode_Shape_of_a_Round_Plate_Mode_2.png
- Coupled harmonic oscillators (SVG): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coupled_Harmonic_Oscillators.svg
- Cantilever beam mode 2 (GIF): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cantilevered_Euler-Bernoulli_beam_excited_at_mode_2_resonance.gif - Beam mode 6 (GIF): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beam_mode_6.gif - Response spectrum figures: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eqresp1.png> e <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eqresp2.png> - Resonance envelope vs damping: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mplwp_resonance_zeta_0.05.png
- Harmonic oscillator gain: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harmonic_oscillator_gain.png
- Vortex street animation (GIF): <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vortex-street-animation.gif> - Taipei 101 Tuned Mass Damper: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Taipei_101_TMD_animation.gif
- Base isolators under the Utah State Capitol: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Base_isolators_under_the_Utah_State_Capitol.jpg