



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

## **Aplicação do Adimensional de Scruton na Avaliação de Desempenho de Vibrações de Sistemas Estruturais de Pontes de Pedestres Mistas**

Euclides Trovato Neto<sup>1,2</sup>, Alfonso Pappalardo Jr.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Thornton Tomasetti do Brasil - BRZ-Experts

<sup>2</sup> Universidade Presbiteriana Mackenzie – Escola de Engenharia – PPG Eng. Materiais e Nanotecnologia  
trovato.euclides@gmail.com

<sup>3</sup> Universidade Presbiteriana Mackenzie – Escola de Engenharia – Engenharia Civil  
alfonso.pappalardo@mackenzie.br

### **Resumo**

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de pesquisas de aplicação do Parâmetro Adimensional de Scruton  $S_c$  para a determinação de condições de desempenho de sistemas estruturais de pontes de pedestres mistas submetidas a efeitos de vibrações transientes resultantes da movimentação de pessoas. Sistemas de estruturas de pontes de pedestres e passarelas são crescentemente utilizadas como infraestrutura urbanística e arquitetural. Estas conferem maior conforto e segurança ao deslocamento de pessoas nos ambientes edificados ou naturais. Seja no contexto de facilidades em sistemas de transporte, seja como recurso de comunicação e acessibilidade edilícia, ou ainda na transposição de cursos d'água ou acidentes. Contemporaneamente, desenvolvimentos de projetos arquitetônicos de pontes de pedestres, evoluíram para formas arrojadas dos sistemas estruturais, geometricamente complexas e esbeltas, com a aplicação de materiais tecnológicos industriais de distintas características de leveza e de elevada resistência mecânica.

O uso de estruturas mistas de aço e concreto tem experimentado expressivo desenvolvimento na indústria da construção civil no Brasil, em boa medida contando com esteio técnico normativo nacional.

Entretanto, há ainda necessidade de desenvolvimentos de pesquisas relativas às condições de resistência e ao comportamento em uso dos sistemas estruturais mistos. As normativas brasileiras se mostram pouco prescritivas, ou genéricas, quanto a critérios de desempenho de vibrações de sistemas de passarelas, como por exemplo o Anexo L da NBR 8800 (ABNT, 2008) e a NBR 7188 (ABNT, 2013). Essas normas indicam concisamente que em passarelas esbeltas e leves (sejam estas de aço, mistas, pênseis ou estaiadas), sensíveis a vento, e a ação dinâmica dos pedestres, é necessária a comprovação de sua estabilidade global e a verificação dos diversos elementos estruturais através de modelos numéricos de análise dinâmica e verificação à fadiga. O presente trabalho objetiva aplicar metodologias analíticas simples e robustas à avaliação do comportamento de estruturas de pontes de pedestres, submetidas a condições de vibrações transientes. Pesquisas nas áreas de vibrações de sistemas estruturais, sob interações fluidodinâmicas, permitiram caracterizar a influência de distintos grupos adimensionais correlacionados à resposta vibracional.

O parâmetro adimensional de Scruton  $S_c$ , aplicado ao fluxo de movimentação de pessoas ao longo de dada estrutura de ponte ou passarela, oferece um indicador, de profunda interpretação física, da tendência à oscilação sincronizada, compassada com a vibração natural dessas estruturas. Conduz a avaliações quantitativas abrangentes do comportamento estrutural sob ações dinâmicas, facultando considerar critérios de utilização, assim como condições de instabilidade e risco estruturais (Mc ROBIE, 2002). Vide NGUYES (1995), NEWLAND (2004) e INGOLFSSON (2012) para revisão de pesquisas sobre vibrações em pontes de pedestres, e a relevância do parâmetro de Scruton para caracterização de desempenho de vibrações laterais destes sistemas sob efeito de excitação sincronizada.

Como estudo objetivo, se aplica tal conceituação analítica, com base em resultados de modelos numéricos MEF, à avaliação do comportamento de vibrações de sistemas de estruturas mistas de passarelas de pedestres, sob variação de valores de parâmetros de Scruton  $S_c$ . Tem-se o caso do sistema estrutural da passarela de pedestres do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do Hospital Albert Einstein em São Paulo (AELRC).

**Palavras-chave:** Critérios de Utilização. Vibrações Estruturais. Adimensionais de Scruton. Passarelas. Ações Transientes.



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

## Da aplicação do Parâmetro Adimensional de Scruton $S_c$

O parâmetro adimensional de Scruton  $S_c$ , na sua formulação original, estabelece correlação entre as massas estruturais e fluidodinâmicas, e a razão de amortecimento intrínseco ou constitutivo  $\zeta$  do sistema estrutural. Analogamente ao mecanismo de Vibrações Transversais Induzidas por Vórtices (VIV), o grupo adimensional de Scruton é estabelecido em relação à movimentação de pessoas sobre os sistemas estruturais, permitindo definir critérios quantitativos adimensionais, para caracterizar a tendência à vibração de passarelas, e por extensão do desempenho desses sistemas estruturais quando submetidos a ações dinâmicas transientes.

É de notar que distintas condições limites de desempenho e utilização estruturais mantêm forte correlação com o parâmetro adimensional de Scruton, inclusive observadas experimentalmente. Tais como: i) Fenômenos de VIV e Fluidodinâmicos pela ação de fluxos de vento ou água; ii) Vibrações devidas à ação de chuvas; iii) Vibrações de sistemas de cabos e estais; iv) Vibrações induzidas pela passagem de veículos. As ações fluidodinâmicas que induzem vibrações estruturais recaem em três categorias (NAUDASCHER, 2005):

- Excitação Induzida Exteriormente (vibrações forçadas por equipamentos, atuadores, veículos);
- Excitação Induzida por Instabilidade (acoplamento entre vibrações e ações fluidodinâmicas);
- Excitação Induzida por Movimentos (ações causadas por efeitos inerciais e vibrações estruturais).

Para descrever tais ações de interação fluidodinâmicas-estruturais, tanto as devidas à instabilidade como à movimentação, Christopher Scruton (1963) propôs a aplicação de componentes de ações que variam com os deslocamentos e velocidades e frequências naturais do corpo. Estas forças podem ser aproximadamente representadas por componentes harmônicas, em fase e em quadratura com a movimentação, nas quais os coeficientes são funções da frequência de vibração estrutural.

Observa-se, de modo qualitativo, que a movimentação de um sólido imerso em um fluido em repouso, e sua interação acoplada de translação e rotação no plano, com as forças generalizadas descritas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_\theta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{yx} & A_{\theta x} \\ A_{xy} & A_{yy} & A_{\theta y} \\ A_{x\theta} & A_{y\theta} & A_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

na qual  $A_{ij}$  representa a matriz de massa adicional,  $F_i$  representa as componentes vetoriais de forças nas direções  $x$  (horizontal),  $y$  (vertical) e rotação  $\theta$  e respectivas acelerações. Considerando que apenas a aceleração na direção horizontal  $\ddot{x} \neq 0$ , tem-se forças de acoplamento verticais  $F_y$  e Momento  $M_\theta$ , não nulas, na forma:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_\theta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{yx} & A_{\theta x} \\ A_{xy} & A_{yy} & A_{\theta y} \\ A_{x\theta} & A_{y\theta} & A_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Nestas a força vertical  $F_y = -A_{xy}\ddot{x}$ , e momento  $M_\theta = -A_{x\theta}\ddot{x}$  dependem somente da aceleração horizontal  $\ddot{x}$ . Tal acoplamento se revela nas vibrações transversais associadas ao deslocamento de pessoas na direção longitudinal de uma ponte de pedestres, em analogia com o fenômeno de vibrações induzidas por vórtices.

São condições nas quais o parâmetro adimensional de Scruton  $S_{cp}$  mantêm correlação entre a taxa de amortecimento estrutural modal  $\zeta$ , a razão entre as massas estruturais  $M$  e as massas equivalentes ao fluxo da passagem de pedestres  $m$ , denominada parâmetro de Massa-Amortecimento. As massas participantes da vibração podem ser avaliadas na forma Modal ou, simplificada, pela relação das Massas Unitárias.

Na forma reduzida e adaptada para avaliações em pontes de pedestres, tem-se:

$$S_{cp} = 2 \cdot \zeta \cdot M/m \quad (3)$$

Nos sistemas de estruturas de pontes de pedestres, o parâmetro  $S_{cp}$  se associa à amplitude de respostas máximas das vibrações nas direções vertical e laterais, decorrentes da movimentação de pessoa, condição na qual o parâmetro de Scruton  $S_{cp}$  representa um indicador simples e robusto da tendência à movimentação de oscilação sincronizada, compassada, com a vibração natural dessas estruturas. Consulte INGOLFSSON (2012), NGUYES (1995), NEWLAND (2004) e Mc ROBIE (2002).



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

## Características Gerais da Edificação AELRC e do Sistema Estrutural de Ponte de Pedestre

O Centro de Ensino e Pesquisa Albert Einstein – AELRC (Albert Einstein Learning and Research Center), integrará o complexo hospitalar Hospital da Sociedade Israelita Brasileira Albert Einstein em São Paulo SP.

As instalações do edifício AELRC, projetadas pelo arquiteto Moshe Safdie, acomodarão cerca de 3320 pessoas, em área total construída de 43356 m<sup>2</sup>. O edifício dispõe espaços para salas de aula e seminários, instalações laboratoriais, auditório, biblioteca, atrium para concentrações de pessoas e atividades de lazer, sistemas de instalações e setores administrativos e operacionais. A ponte de pedestres, interligando diretamente ambos os complexos, oferecerá uma conexão protegida e segura, se estendendo sobre a movimentada Avenida Padre Lebreton no bairro do Morumbi.

A arquitetura da ponte permite níveis equivalentes de desempenho de conforto interno em termos de parâmetros de ventilação e ar condicionado, temperatura, bem como iluminação, compatíveis com os edifícios adjacentes. Cumpre ainda com padrões formais de segurança operacional e acessibilidade, incluindo requisitos de sistema de segurança contra incêndio, sistema de manutenção, além de critérios de segurança e desempenho estruturais. Na Figura 1, a perspectiva arquitetônica apresenta, em primeiro plano, o Edifício AELRC, e em segundo plano a ponte de pedestres, e as edificações do complexo hospitalar ao fundo.



Figura 1 – Vista geral AELRC – Perspectiva Arquitetônica

O projeto estrutural foi desenvolvido pela Thornton Tomasetti Brasil em parceria com a BRZ-Experts, com consultoria geotécnica da InfraEstrutura, com Fabricação Mectal, e Construção Racional Engenharia. A Figura 2 descreve o arranjo geral da Ponte Pedonal Externa, e sua localização relativa entre o complexo hospitalar existente e a construção do AELRC, assim como a infraestrutura urbana viária. A Figura 3 apresenta uma vista lateral do Sistema Estrutural Primário da superestrutura em treliça espacial, colunas de suporte e infraestrutura de fundações, com indicações de dimensões gerais e níveis de altimetria. A estrutura tem 13,9 m de altura média acima do nível do solo, tendo comprimento total de 52,3 m, com dois balanços respectivamente de 19,4 m e 10,4 m, apresentando sua seção transversal 3,45×3,6 m. Detalhes representativos da meso e infraestruturas são indicados na Figura 4.

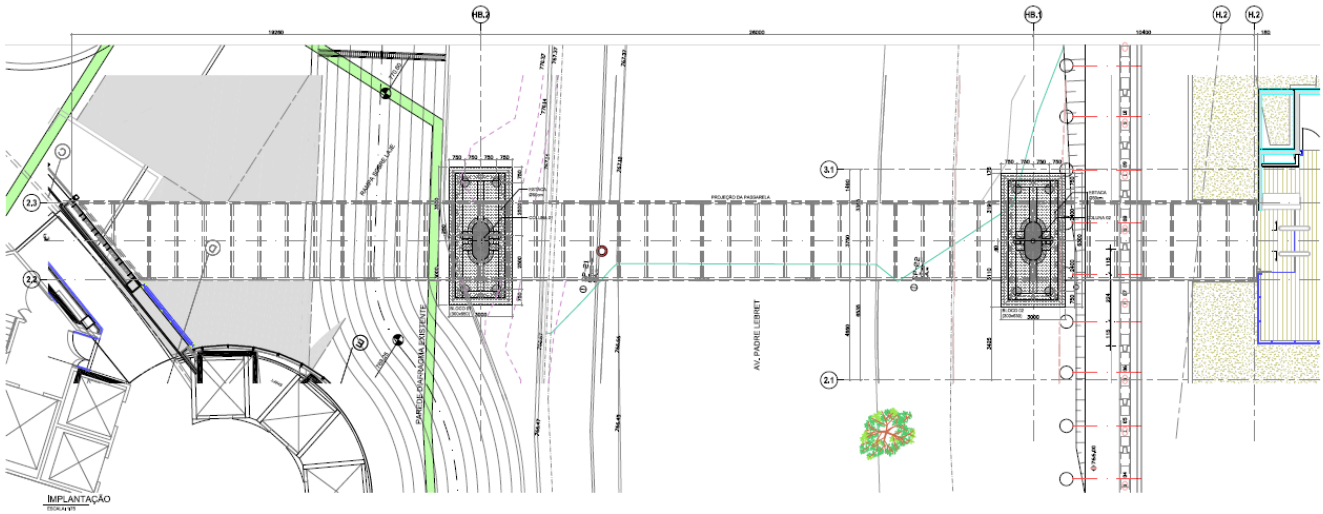


Figura 2 – Ponte de pedestres externa AELRC – Implantação – Vista Superior

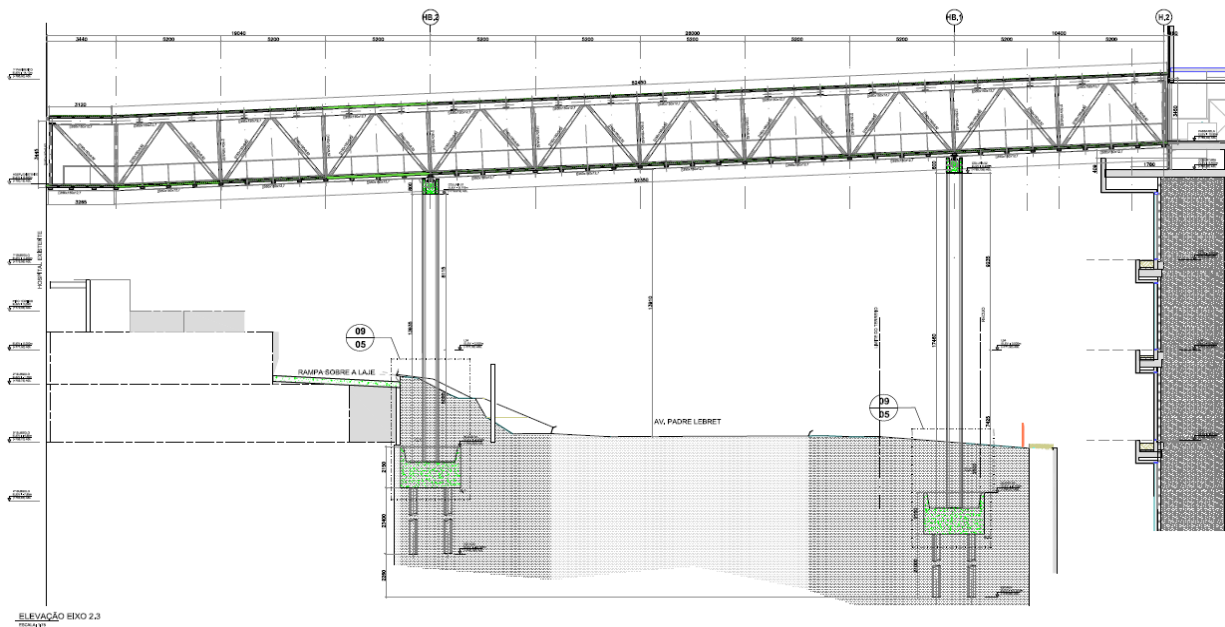


Figura 3 – Ponte de pedestres externa AELRC – Sistema Estrutural – Vista Lateral



Figura 4 – Ponte de pedestres externa AELRC – Meso e Infraestruturas – Detalhes



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

O sistema estrutural primário da Ponte Pedonal AELRC integra três subsistemas, como descrito abaixo. A ênfase construtiva na aplicação de componentes mistos, objetiva garantir melhor desempenho em termos de resistência mecânica, assim como de comportamento dinâmico e resposta ante as vibrações.

Distintos tipos de solicitações dinâmicas incidem sobre a estrutura como um todo, nominalmente: a) ações dinâmicas devidas ao vento, b) vibrações induzidas na fundação por veículos, c) impacto/colisão de veículos. Estas foram tratadas em projeto, tendo em vista garantir condições de integridade e segurança estruturais.

Neste trabalho, o foco será orientado às vibrações transientes por efeito do deslocamento de pessoas. Tal desempenho é constitutivamente garantido pelo maior amortecimento intrínseco da ação composta, sendo aspecto fundamental no controle e mitigação de efeitos de vibrações (ENGLEKIRK, 1994). Adicionalmente, a aplicação de componentes principais mistos estabelece filtros de vibrações, os quais atenuam sensivelmente o nível de resposta dinâmica, conferindo maiores fatores de impedância, tanto em termos de rigidez, quanto de amortecimento e mobilidade, e de impedância inercial/massas, como discutido em CRANDALL (1958).

**i) Superestrutura:**

O sistema estrutural primário é em treliça espacial de aço estrutural do tipo Warren, com 52,3 m de comprimento total, subdividido em 11 painéis, apoiada sobre duas colunas sobre aparelhos de apoio fixos de rotação livre. A estrutura tem banzos superiores e inferiores em tubos retangulares RHS 350×150×12,7 mm, com diagonais e colunas de RHS 150×150×9,52, e travessas inferiores com RHS 200×100×6,5 mm em aço de alta resistência ASTM A-501 Grau 50. As travessas superiores são em HP 310×79 ASTM A-572 a cada 5,2 m. As conexões estruturais são soldadas conforme procedimentos AWS D1.1. Os tabuleiros de cobertura e de piso constituem sistemas mistos, integrados à treliça metálica, de concreto com resistência característica  $f_{ck} > 35$  MPa, formas tipo steel deck de aço 60×0,95 mm, altura de 120 mm, armadas com malhas aço 150×150×9,5 mm. Na treliça, as travessas de apoio principais, são componentes mistos, tipo CFT.

**ii) Mesoestrutura:**

Colunas Mistas Concreto-Aço de tipo CFT (Concrete Filled Tube), com seção transversal de forma lenticular, e altura total de 12,9 m. A casca metálica é em aço ASTM A-242 Grau 50 de alta resistência mecânica e à corrosão. Tem construção soldada e enrijecida internamente. O núcleo das colunas é concreto armado lançado no local, com resistência característica  $f_{ck} > 50$  MPa, com armadura longitudinal e de cisalhamento em aço CA-50. O capitel de cada coluna estabelece uma viga transversal de construção mista concreto-aço, soldados de modo integrado às colunas, sobre as quais se fixam os aparelhos de apoio articulados para base das treliças. Como detalhe distintivo, de importância para o comportamento dinâmico vibracional, são aplicadas placas de apoio elástico em superpluretano, com dimensões de 175×350 (largura)×35 mm. Este componente tem a função de acomodar condições de contato e dilatações locais entre a super e mesoestruturas, e oferecer condições de isolamento e atenuação de vibrações. As fixações dos aparelhos de apoio sobre os capiteis aplica barras de ancoragens Dywidag de alta resistência ST 95 kN/cm<sup>2</sup>.

**iii) Infraestrutura:**

A infraestrutura de fundações consiste em 2 blocos de estacas em construção mista concreto-aço, os quais alojam 8 estacas-raiz em concreto armado com diâmetro de 250 mm × 27 m de comprimento em média. A ação mista concreto-aço, permite adotar detalhe construtivo do bloco flexível, reduzindo drasticamente o volume total de concreto e de escavação requerido. Este é definido por uma grelha metálica soldada, em perfis tipo W de alta resistência, em aço ASTM A-572, os quais são ancorados em nichos no corpo de concreto dos blocos, através de ancoragens Dywidag de alto desempenho. Esta base metálica é posteriormente concretada após a instalação e soldagem das colunas, definindo componentes embutidos no concreto, tipo Embedded Member.

## Modelo Discreto e Resultados de Análises de Vibrações Naturais

O sistema de análise ETABS (2016) de Elementos Finitos, foi aplicado ao desenvolvimento das análises numéricas estáticas e dinâmicas lineares, para conduzir avaliações normativas das estruturas metálicas e mistas conforme a AISC (2015), com projeto e dimensionamento dos componentes de modo integrado. Concisamente, a descrição da topologia estrutural é apresentada no diagrama unifilar da Figura 5.

O modelo discreto, utiliza elementos de barras de Timoshenko, para representação das vigas. Elementos de placas de formulação isoparamétrica compatíveis, consideram termos de energia potencial elástica de deformação flexional e de membrana, para as placas de tabuleiros mistos, integrados à treliça. A formulação topológica desses elementos diferencia as camadas de material metálico e de concreto, oferecendo representação simplificada, porém robusta, da rigidez de interação e compatibilidade entre vigas e lajes mistas. Condições de contorno representativas das fundações, foram tratadas como apoios fixos engastados, nas bases das colunas, simplificadamente. Formulações constitutivas dos materiais de aço de alta resistência, e de concreto foram considerados, bem como descritas em detalhes as características seccionais dos componentes estruturais.

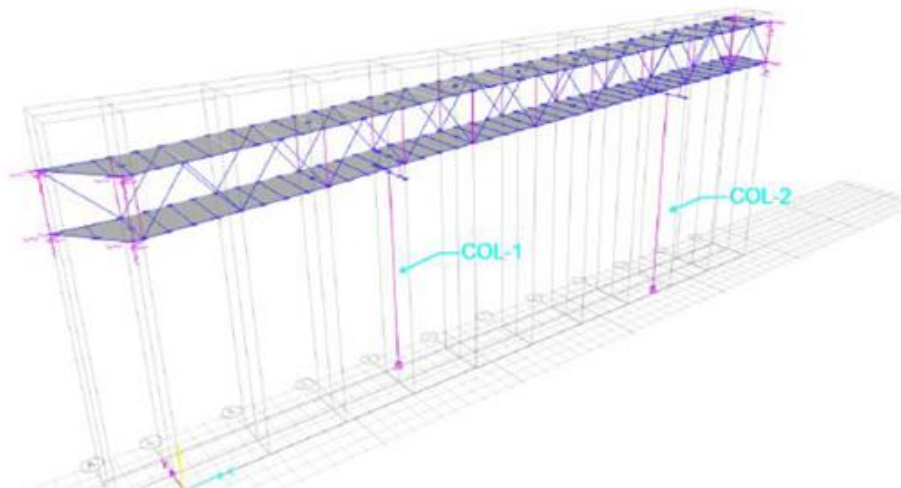


Figura 5 – Ponte de pedestres externa AELRC – Topologia do Sistema Estrutural Discreto MEF

Os procedimentos de análises dinâmicas para determinação de autovalores de frequências naturais e modos de vibração, aplicam a metodologia algébrica de Lanczos. Foram selecionados 25 primeiros modos de vibração natural, que permitiram atingir representação da massa de participação modal superior a 99% nas direções longitudinal e vertical X e Z e 87,5% na direção transversal global Y. Conservadoramente, não se considera os efeitos de amortecimento modal, observando que os tabuleiros mistos de piso e cobertura, assim como as colunas mistas, adicionam significativo amortecimento intrínseco complementar.

Resultados chave da análise de autovalores dinâmicos do sistema estrutural primário de ponte de pedestres são apresentados de forma concisa. A Tabela 1 apresenta sinoticamente os resultados da análise modal. Observa-se, por inspeção das frequências naturais que o período fundamental é  $T_1 = 0,892s < 1,0 s$ , enquanto a frequência fundamental é  $f_1 = 1,19 \text{ Hz}$  típico de estruturas de passarelas similares. As Figuras 6 e 7 subsequentes apresentam concisamente os quatro primeiros modos de vibração natural.

A ponte externa, portanto, está em conformidade com a Seção 9.1 da NBR 6123 (ABNT, 1988), com relação a amplificações de resposta ao deslocamento sob ações dinâmicas de vento, resultado coerente com medições em túnel de vento. A faixa de frequências naturais entre  $i = 1^\circ$  ao 6º modos, tal que  $1.19 < f_i < 5.0 \text{ Hz}$ , abrange as frequências tipicamente associadas aos deslocamentos de pessoas, em distintas velocidades entre caminhada e corrida.

Tabela 1 – Períodos Modais e Frequências de Vibrações Naturais

Modo de vibração	Período $T$ (s)	Frequência $f$ (Hz)	Frequência circular $\omega$ (rad/s)	Autovalor $\omega^2$ (rad <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
1	0,840	1,191	7,484	56,013
2	0,823	1,215	7,636	58,312
3	0,651	1,537	9,656	93,237
4	0,316	3,169	19,914	396,561
5	0,214	4,683	29,422	868,639
6	0,198	5,050	31,732	1006,894
7	0,129	7,744	48,656	2367,432
8	0,104	9,647	60,615	3674,161
9	0,089	11,263	70,767	5008,027
10	0,082	12,203	76,672	5878,573
11	0,073	13,685	85,983	7393,007
12	0,053	18,924	118,906	14138,508

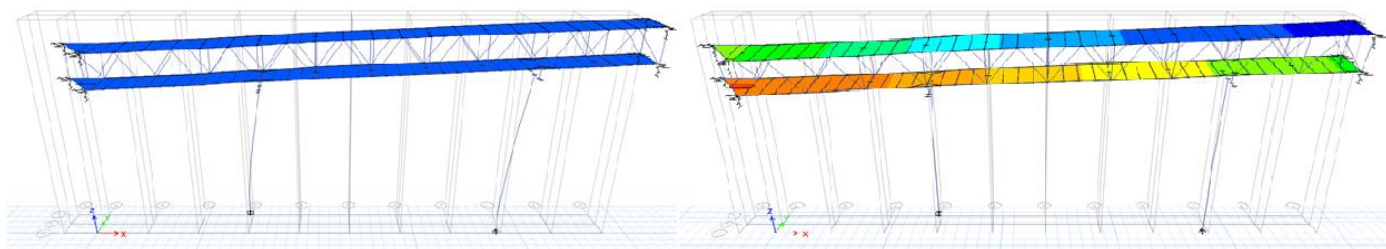


Figura 6 – Ponte de pedestres AELRC – Modos de vibração associados às frequências naturais  $f_1 = 1,19$  Hz e  $f_2 = 1,21$  Hz

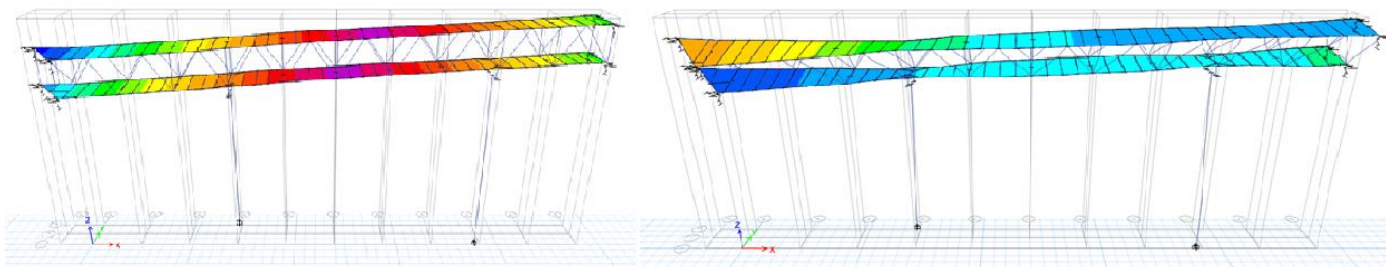


Figura 7 – Ponte de pedestres AELRC – Modos de vibração associados às frequências naturais  $f_3 = 1,54$  Hz e  $f_4 = 3,17$  Hz

Enquanto o 1º e o 2º modos de vibração indicam, respectivamente, deslocamentos predominantemente nas direções longitudinais X e transversal Y, o 3º e 4º modos têm deslocamentos combinados nas direções XYZ. De notar que as vibrações transientes sobre a ponte resultantes do trânsito de pessoas, incidem predominantemente nesta mesma faixa de modos de vibrações naturais, o que recomenda a adoção de medidas de mitigação e controle.

Procedimentos de análises dinâmicas referidos a CLOUGH, PENZIEN (1986) e MEIEROVITCH (1986).



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

## Avaliação de Desempenho de Vibrações Estruturais em Pontes de Pedestres

Os critérios normativos de desempenho de vibração estrutural, associada ao movimento de pessoas, são adotados como referência básica ao projeto do sistema de estrutura metálica, conforme abaixo.

### Critérios da NBR 8800 – Anexo W

Tal critério normativo é geralmente aplicado para avaliar o desempenho de vibrações de pisos, submetidas a excitações regulares, os quais serão aqui revistos com discrição. As frequências naturais mais baixas  $f_v$  associadas à vibração do piso devem ser superiores a 5 Hz. Os modos de vibração de piso mais baixos são 7º ( $f_7 = 7,75$  Hz) e 8º ( $f_8 = 9,65$  Hz), com  $f > f_{crit} = 5$  Hz (OK). Os deslocamentos verticais das vigas do piso, sob ações permanentes são limitados a 10 mm:

$$\Delta = 34 \text{ mm} - 28 \text{ mm} = 6 \text{ mm} < \Delta^{m\acute{a}x} = 10 \text{ mm (OK)}.$$

Assim os critérios de frequência e deslocamento foram, portanto, satisfatoriamente atendidos.

Pode-se inferir que, para os 5 modos de vibração naturais mais baixos, com  $f < f_{crit} = 5,0$  Hz, também resultariam aceitáveis, em princípio, pela existência de mecanismos de vibração dissipativos como fricção e amortecimento, além da menor participação em massas modais na direção vertical. Os parâmetros de amortecimento intrínseco recomendados pela NBR 8800 (ABNT, 2008) são indicados abaixo:

- Razão de amortecimento estrutural intrínseco mínimo normativo para aço estrutural:  $\zeta = 0,0100$ ;
- Taxa de amortecimento estrutural intrínseca mínima normativa para lajes e pisos compostos:  $\zeta = 0,0125$ .

### Caracterização Cíclica de Movimentação de Pessoas

Por inspeção das frequências naturais de vibrações, não há estritamente coincidência entre as frequências do modo de vibração natural  $f_i$  e as frequências cíclicas associadas ao deslocamento de caminhada, seja na direção vertical ou horizontal, as quais variam entre  $0,85 \text{ Hz} < f_p < 3,2 \text{ Hz}$ .

Tabela 2 – Avaliação de frequências cíclicas de movimentação de pessoas

Padrão de caminhada	Frequências Cíclicas – Caminhada de Pessoas ( Hz)				
	$f_p$ Frequência (passo)	Velocidade (m/s)	Comprimento M	Frequência vertical Z	Frequência lateral Y
Caminhada lenta	1,7	1,1	0,6	1,7	0,85
Caminhada normal	2,0	1,5	0,75	2,0	1,0
Caminhada rápida	2,3	2,2	1,0	2,3	1,15
Corrida normal	2,5	3,3	1,3	2,5	1,25
Corrida rápida	3,2	5,5	1,75	> 3,2	> 1,6

onde: frequência de excitação vertical = frequência de passo  $f_p$   
frequência de excitação horizontal =  $0,5 f_p$

Para movimentação em corrida, a faixa de frequência do 4º modo de vibração natural é excitada na direção vertical. Na direção horizontal, a frequência do 2º modo de vibração natural é excitada sob caminhada rápida. Portanto, apenas para os padrões de corrida os efeitos das vibrações estruturais serão ligeiramente percebidos. Na subseção seguinte, se avaliam os efeitos de vibração segundo critério do parâmetro de Scruton  $S_{cp}$ .





XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

### **Critério de desempenho de vibrações – Parâmetro Adimensional Scruton $S_{cp}$**

Nesta seção, aplica-se a avaliação dos efeitos de vibração segundo o Critério do Parâmetro de Scruton  $S_{cp}$ . Devido aos modos de vibrações laterais observados na ponte externa, estes estão associados ao comportamento de oscilação lateral e longitudinal das colunas.

O Número Adimensional de Scruton, interpretado para translação de pessoas em passarelas, permite caracterizar e indicar a tendência do sistema estrutural em desenvolver vibrações transversais autoexcitadas e instáveis, ou se seriam relativamente amplificadas, ou amortecidas, pelo caminhar na direção longitudinal.

Para movimentações sincronizadas de pedestres, o número de Scruton  $S_{cp}$  é diretamente correlacionado com o parâmetro de razão de amortecimento  $\zeta$  e o parâmetro adimensional de razão de massa  $M/m$ . Nesta,  $m$  é a massa equivalente associada ao pedestre por unidade de comprimento, e  $M$  é a massa estrutural permanente unitária. Notar ainda que tal formulação pode ser aplicada a cada modo independentemente, no que se exige considerar as massas modais respectivas e amortecimentos modais. Por conveniência, rerepresenta-se a equação (3) na forma reduzida, adaptada para avaliações em pontes de pedestres:

$$S_{cp} = 2 \cdot \zeta \cdot M/m$$

com  $S_{cp} > \alpha\beta$  sendo:  $\alpha = 2/3$  e  $\beta=0,4$ .

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são determinados empiricamente, em correlação às amplitudes de resposta de deslocamento lateral do pedestre, e a oscilação devido à vibração estrutural natural, observadas em passarelas. Para  $S_{cp} < \alpha\beta$ , as amplitudes de resposta de vibrações atingem frequências autoexcitadas, sincronizadas com as frequências naturais estruturais, sendo assim dinamicamente amplificadas. Para  $S_{cp} > \alpha\beta$ , tem-se regime de vibrações atenuadas de forma consistente.

Considera-se, para avaliação do Parâmetro de Scruton  $S_{cp}$  utiliza-se o comprimento médio do vão central da passarela  $L=38$  m, peso unitário da estrutura em média no vão central  $M = 1640/38$  kN/m = 43,2 kN/m e peso unitário de um grupo de pedestres caminhando ao mesmo passo  $m = 3,5$  kN/m. Tem-se  $M/m = 12,33$  parâmetro de massa adimensionalizada. Em geral tem-se relativamente pouco controle na determinação do parâmetro de amortecimento  $\zeta$ , exceto quando seja possível determiná-lo por testes empíricos, pela medição do decaimento logarítmico. Como referência, se observam valores normativos representativos do amortecimento estrutural  $\zeta$  intrínseco. Neste trabalho são considerados valores mínimos recomendados pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

O Quadro 1 apresenta concisamente os resultados obtidos de avaliação de  $S_{cp}$  que indicam adequação do comportamento de resposta a vibrações induzidas pela movimentação de pessoas na ponte pedonal.

Quadro 1 – Avaliação do Parâmetro Adimensional Scruton  $S_{cp}$

S <sub>cp</sub> – Parâmetro adimensional de Scruton – Quadro de Avaliação		
Amortecimento $\zeta$	S <sub>cp</sub>	Limite S <sub>cp</sub> = $\alpha\beta$
0,0125	0,30 > 0,26 OK	0,26
0,0250	0,60 > 0,26 OK	
0,0375	0,90 > 0,26 OK	
0,0500	1,20 > 0,26 OK	

Os resultados acima indicam que a resposta às vibrações transientes, tendem a ser inerentemente estáveis para a faixa de coeficientes de amortecimento críticas  $\zeta$  considerada, assim como de relação de massas  $M/m$ .

## Conclusões e discussões

Este trabalho tem por cerne de pesquisa, a aplicação do parâmetro adimensional de Scruton  $S_{cp}$  para a avaliação de condições de desempenho de utilização de sistemas estruturais de pontes de pedestres mistas submetidas a efeitos de vibrações transientes resultantes da movimentação de pessoas.

Uma revisão do desenvolvimento atual de pesquisas sobre o tema foi apresentada, incluindo-se breve introdução conceitual sobre a interpretação física do adimensional de Scruton  $S_{cp}$ , em correspondência a fenômenos de vibrações induzidas por fluxos de fluidos. Nestas o adimensional de Scruton  $S_{cp}$  mantém analogia completa com o parâmetro  $S_{cp}$ , aplicado na forma reduzida para sistemas de estruturas de pontes.

Apresenta-se um estudo de caso, aplicado ao desenvolvimento do projeto do sistema de passarela estrutural de pedestre do AELRC, em São Paulo SP. Esta estrutura apresenta requisitos rigorosos de desempenho de segurança, integridade e utilização em serviço, nos quais medidas de controle e limitação de efeitos de vibrações transientes e de demais tipos foram criteriosamente observadas.

Resultados das análises numéricas estruturais, permitiram aprofundar a interpretação do comportamento de vibração natural da estrutura em face a critérios normativos da NBR 8800 (ABNT, 2008), assim como avaliar qualitativamente a características de frequências cíclicas associadas a padrões de deslocamento.

A avaliação dos parâmetros de Scruton  $S_{cp}$  para a ponte pedonal AELRC, indicam que a resposta às vibrações transientes, tendem a ser inerentemente estáveis para a faixa de coeficientes de amortecimento crítico  $\zeta$  considerado, assim como de relação de massas  $M/m$ . Tal ocorre mesmo considerando que a faixa de frequências cíclicas de movimentação se apresenta relativamente contida nas faixas de frequências naturais.

## Referências

- ABNT NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- ABNT NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- AISC. Steel Construction Manual, Chicago Ill. USA, American Institute of Steel Construction, 2015.
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of Structures. 2<sup>nd</sup> ed. Mc Graw Hill, New York, 1986.
- CRANDALL, H. S. et alii. Mechanical Impedance Methods for Mechanical Vibrations –ASME, 1958.
- ENGLEKIRK, R. Steel Structures Controlling Behaviour Through Design. John Willey & Sons, 1994.
- ETABS v.16. Finite Element System. Walnut Creek: CSI Computers and Structures Inc., 2016.
- INGOLFSSON, E. T.; JONSSON, J. Pedestrian Induced Lateral Vibration of footbridges – A literature Review. Journal of Engineering Structures, v. 45, Elsevier 2012.
- Mc ROBIE, A.; MORGENTHAL, G. Risk Management for pedestrian-induced dynamics of footbridges. In Proceedings of the International Conference on Footbridges 2002, Paris, France, 2002
- MEIEROVITCH, L. Elements of Vibration Analysis. Mc Graw Hill, New York, 1986.
- NAUDASCHER E.; ROCKWELL, D. Flow Induced Vibration – An Engineering Guide. Dover Inc., 2005.
- NEWLAND, D. Pedestrian excitation of bridges. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science - Proc. Inst. Mech. Eng. C-J Mech.,2004.
- NGUYEN, M. N. Man Induced Vibration on Pedestrian Bridges, PhD Thesis, AIT, Bangkok, 1995.
- SCRUTON, C. On the Wind Excited Oscillations of Stacks, Towers and Masts. 1<sup>st</sup> Conference of Wind Effects on Building Structures. Teddington, UK, 1963.

## Agradecimentos

Reconhecimentos especiais pela colaboração das seguintes instituições, suas equipes e responsáveis:

- Albert Einstein Learning & Research Center(AELRC) / Junia Gontijo
- Thornton Tomasetti Inc / Joseph Burns: <https://www.thorntontomasetti.com>
- BRZ-Experts/ Newton Meier Borelli: <https://www.brz-experts.com.br>