

## DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O ENSINO DE ENGENHARIA E AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONFORTO HUMANO DE PASSARELAS DE PEDESTRES

Irwing Aguiar Ribeiro da Silva – iwng@msn.com

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã

20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

José Guilherme Santos da Silva – jgss@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã

20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

**Resumo:** Este trabalho de pesquisa apresenta como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia para o ensino de engenharia, com base na utilização de um programa computacional a ser empregado para o ensino nos cursos de graduação e de pós-graduação em Engenharia Civil, e profissionais projetistas de estruturas. Assim sendo, o programa HCPF foi desenvolvido para permitir a análise estrutural e avaliação dos níveis de conforto humano de passarelas de pedestres, segundo as metodologias de projeto propostas nos guias internacionais HIVOSS [Human Induced Vibration of Steel Structures] e SÉTRA [Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridges under Pedestrian Loading], objetivando o ensino de engenharia, de maneira prática e automatizada. O desenvolvimento de aplicativos computacionais é de grande relevância, no sentido de permitir aos alunos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, FEN/UERJ, compreender com maior clareza todos os parâmetros físicos envolvidos com o comportamento e a análise estrutural; e, em particular, a avaliação dos níveis de conforto humano sobre o projeto de passarelas de pedestres. Esta foi a principal motivação para o desenvolvimento deste aplicativo computacional, no âmbito do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ, de modo a estimular e motivar os alunos de graduação e de pós-graduação para o estudo e análise desse tipo de problema.

**Palavras-chave:** Ensino de engenharia, Passarelas de pedestres, Conforto humano.

## 1 INTRODUÇÃO

As passarelas de pedestres, como o próprio nome diz, são estruturas destinadas à travessia de pedestres, cuja ação do caminhar é essencialmente dinâmica. Dessa forma, frequências naturais iguais ou próximas da frequência do passo humano neste tipo de estrutura têm, como consequência direta, um aumento considerável dos problemas associados à vibração excessiva (MENDES, 2014; BACHMAN, 1995).

Cabe ressaltar que a aproximação de frequências naturais das passarelas com as frequências de excitação, oriundas dos pedestres, tem ocorrido correntemente, devido à leveza e esbeltez cada vez maior nas estruturas, fruto de uma tendência de projetos arrojados aliados ao avanço tecnológico na área de engenharia estrutural e ao uso de novos materiais.

Assim sendo, este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal apresentar o programa computacional HCPF (Human Comfort of Pedestrian Footbridges), desenvolvido no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV) da Faculdade de Engenharia (FEN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), com base no emprego de metodologias de análise propostas em guias internacionais de projeto: HIVOSS [Human Induced Vibration of Steel Structures], HIVOSS (2008), e SÉTRA [Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridges under Pedestrian Loading], SÉTRA (2006).

O programa HCPF tem como objetivo ilustrar o desenvolvimento de uma metodologia para o ensino de engenharia, de forma amigável, para os alunos de graduação e de pós-graduação em Engenharia Civil, mediante o uso do aplicativo, além de permitir ao usuário realizar a avaliação do conforto humano de estruturas de passarelas de pedestres, de forma prática e automatizada.

Destaca-se que a funcionalidade oferecida pelo HCPF não se limita apenas ao meio acadêmico, mas configura-se como uma ferramenta útil para os projetistas de passarelas de pedestres, em relação às metodologias aqui investigadas para a avaliação do conforto humano; e, bem como, para a análise do risco de ressonância, quando estas são submetidas ao caminhar humano, principalmente diante da ausência de normas de projeto nacionais sobre o tema.

Finalmente, é importante ressaltar que o desenvolvimento deste tipo de metodologia de ensino, mediante o emprego de um programa computacional amigável para os usuários representa um dos principais elementos motivadores para o desenvolvimento de novos aplicativos para o ensino de Engenharia Civil nos cursos de graduação e de pós-graduação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, FEN/UERJ.

## 2 GUIAS INTERNACIONAIS DE PROJETO

### 2.1 Guia de projeto SÉTRA (SÉTRA, 2006)

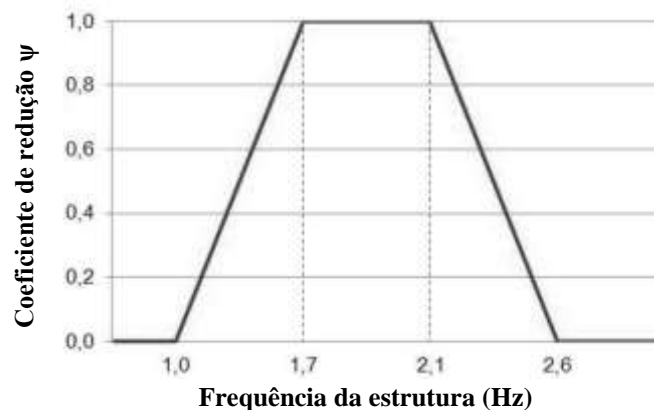
Neste guia de projeto, publicado em 2006 pelo órgão francês SÉTRA (SÉTRA, 2006), uma metodologia prática de análise é apresentada, além de recomendações que orientam os engenheiros civis acerca da consideração da ação dinâmica dos pedestres, com base em classificações realizadas a partir do nível de tráfego e do nível de conforto humano desejado.

As passarelas são divididas em quatro classes de tráfego conforme sua função e frequência de utilização. Para cada classe, o guia especifica uma densidade média de tráfego de pedestres por metro quadrado indicada por  $d$ . Segundo a direção de interesse (vertical, longitudinal ou transversal), o carregamento dinâmico  $F$  ( $N/m^2$ ) pode ser calculado pela Equação (1), através da densidade de pedestres  $d$  (pedestres/ $m^2$ ), da componente  $P$  (N) da força devido a um pedestre isolado com frequência de passada  $f_p$  (Hz), a qual é ajustada para a frequência natural do referido modo de vibração, do número de pedestres equivalente  $Neq$ , do número de pedestres em trânsito  $n$  e do coeficiente de redução  $\psi$ .

$$F(t) = d P \cos(2\pi f_p t) \left( N_{eq}/n \right) \psi \quad (1)$$

A componente  $P$  pode assumir três valores distintos, conforme a direção de interesse, sendo 280 N para a direção vertical, 140 N para a longitudinal e 35 N para a transversal. O coeficiente de redução  $\psi$  (Figura 1) leva em consideração o fato do risco de ressonância em uma passarela tornar-se menos provável na medida em que a frequência natural da estrutura se afasta do intervalo médio de frequência de passo dos pedestres.

Figura 1 - Coeficiente de redução  $\psi$  de vibrações na direção vertical ou longitudinal para primeiro harmônico



A partir daí, pode-se calcular o valor da aceleração em função do carregamento dinâmico  $F$  ( $N/m^2$ ), do coeficiente de amortecimento estrutural  $\xi$ , da massa por área da estrutura, incluindo os pedestres, dada por  $\rho A$  ( $kg/m^2$ ), conforme demonstrado pela Equação (2).

$$a = \frac{1}{2\xi} \frac{4F}{\pi\rho A} \quad (2)$$

O conceito de conforto é totalmente subjetivo, onde cada pedestre percebe de modo diferente um dado nível de aceleração. Além disso, o grau de relevância da estrutura influencia diretamente no que tange essa questão. A Figura 2 ilustra como este guia relaciona os intervalos de aceleração com os níveis de conforto, considerando a direção de vibração vertical.

Figura 2 - Classificação de aceleração por intervalos para vibrações na direção vertical e horizontal longitudinal



## 2.2 Guia de projeto HIVOSS (HIVOSS, 2008)

Também no sentido de orientar o projetista, este guia técnico investiga a resposta dinâmica de várias passarelas submetidas à ação de pedestres através de medições e simulações numéricas. Tal trabalho resultou em recomendações que abrangem requisitos de projetos, níveis de conforto em termos de aceleração, modelos de carregamento para fluxos de pedestres, entre outros HIVOSS (2008).

Assim sendo, caso uma passarela seja suscetível a vibrações que comprometam o conforto, o guia fornece informações adicionais concernentes a procedimentos de medição e metodologias para avaliação das propriedades dinâmicas, modificação de projeto e dispositivos de amortecimento HIVOSS (2008).

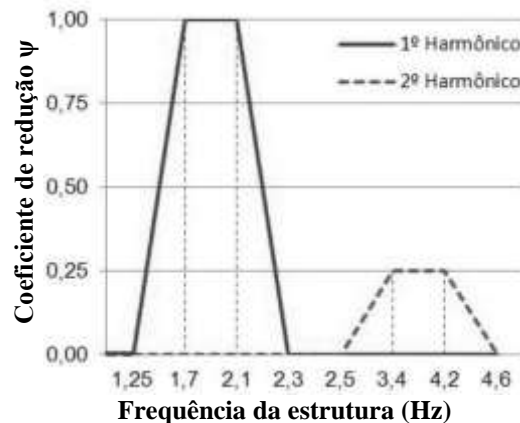
Este guia recomenda, para o cálculo da aceleração máxima da passarela, o uso do método simplificado de 1 grau de liberdade, do método dos elementos finitos e do método dos espectros de resposta. Aos dois primeiros métodos, é necessária a aplicação de um modelo de carga harmônica constituído por um fluxo de  $n$  pedestres aleatórios em caminhada livre e, a partir deste, de um fluxo equivalente e ideal de  $n'$  pedestres perfeitamente sincronizados.

Através do método dos elementos finitos, o carregamento dinâmico do fluxo equivalente de pedestres, considerado uniformemente distribuído sobre toda a superfície  $S$  de tráfego de pedestres na passarela, é dado, em  $N/m^2$ , pela Equação (3):

$$P(t) = P \cos(2 \pi f_p t) n' \psi \quad (3)$$

Nesse guia também, a partir de um coeficiente de redução  $\psi$  avalia-se a probabilidade de  $f_p$  (Hz) se aproximar do intervalo crítico de frequências naturais em análise, conforme pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Coeficiente de redução  $\psi$  para o caso das direções vertical e longitudinal



O valor da componente  $P$  (N) da força devido a um pedestre isolado, com frequência de passada  $f_p$  assumida igual à frequência natural da passarela em análise, é função da direção do modo em análise. Para a direção vertical, assume o valor de 280 N e, para as direções horizontais longitudinal e transversal, 140 e 35 N, respectivamente.

A aceleração máxima da estrutura da passarela em ressonância e associada a uma ação dinâmica pode então ser calculada com base na idealização do método simplificado de 1 grau de liberdade para cada frequência natural da estrutura localizada no intervalo de frequências críticas. O cálculo é expresso pela Equação (4) que relaciona os parâmetros de carga generalizada  $p^*$  (N), massa modal generalizada  $m^*$  (kg), decremento logarítmico  $\delta$  e o coeficiente de amortecimento estrutural  $\xi$ .

$$a_{m\acute{a}x} = \frac{p^*}{m^*} \frac{\pi}{\delta} = \frac{p^*}{m^*} \frac{1}{2\xi} \quad (4)$$

### 2.3 Consideração sobre os guias

Em suma, a partir da identificação do modo de vibração que se pretende analisar, através do valor da frequência e da direção (Figura 4), obtém-se em cada um dos guias o correspondente coeficiente de redução  $\psi$  que leva em consideração o risco de ressonância da estrutura com o carregamento devido ao caminhar do pedestre. Identifica-se também a classe de tráfego apropriada e procede-se ao cálculo da carga dinâmica e, em seguida, o da aceleração. Por fim, determina-se a classe de conforto humano especificamente para o modo de vibração analisado a partir do intervalo ao qual a aceleração calculada pertence.

Figura 4 - Ilustração de um modo de vibração genérico.

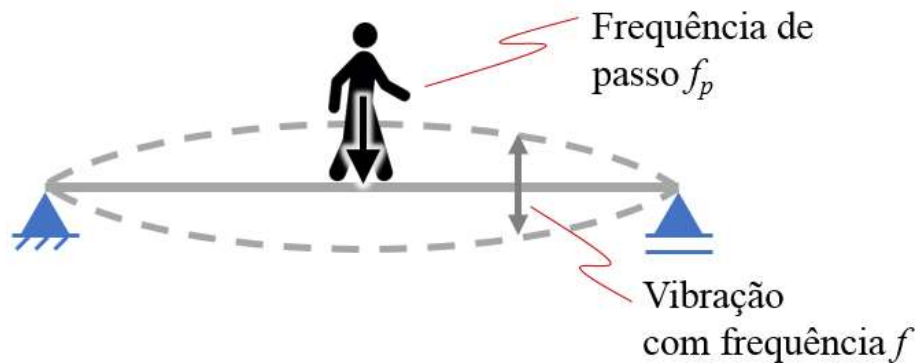


Figura 5 - Imagem típica de pedestre caminhando (SILVA, 2018).

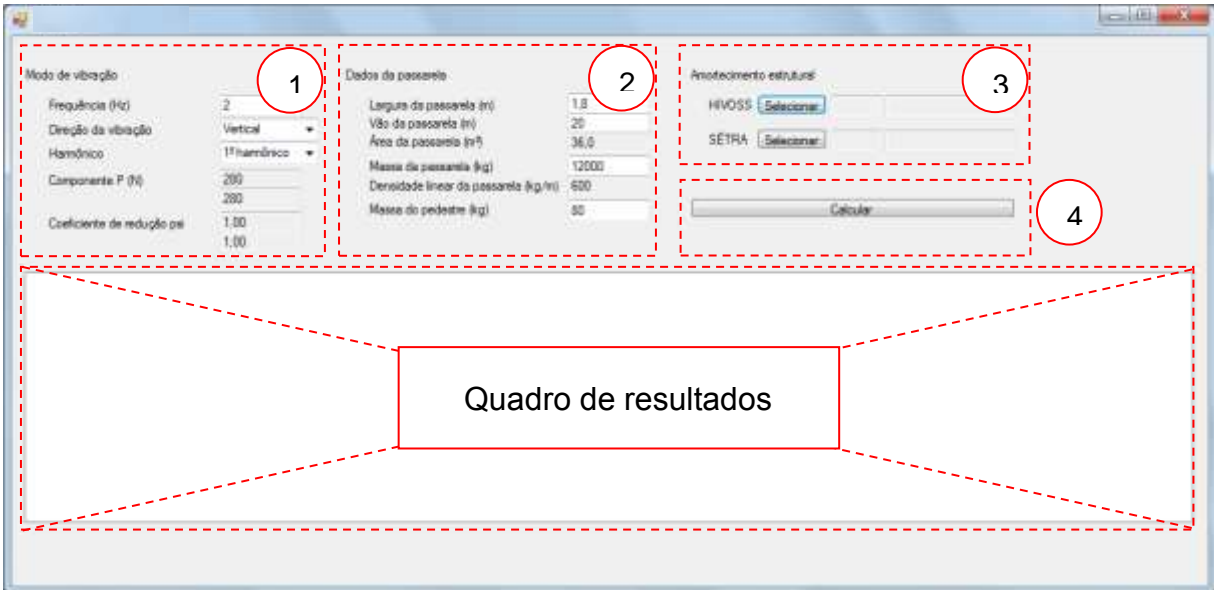


### 3 PROGRAMA HCPF

O programa HCPF, conforto em grego, foi desenvolvido em linguagem de VB (Visual Basic) a partir de uma arquitetura de janela principal única com apoio de janelas auxiliares, baseadas na plataforma Windows. Sua finalidade é a de realizar de forma prática e automatizada cálculos de avaliação do conforto humano em passarelas de pedestres segundo as diretrizes dos guias práticos de projeto HIVOSS (2008), português, e SÉTRA (2006), francês. A entrada de dados varia entre campos para digitação manual e campos para seleção por clique. Por fim, após todo o preenchimento dos dados necessários, o usuário aciona o cálculo através de botão de comando e os resultados são mostrados em um quadro específico.

Ao abrir o programa, o usuário se depara com a janela mostrada na Figura 6, janela principal, que é subdividida em cinco grupos de informações/ações: Modo de vibração (1), Dados da Passarela (2), Amortecimento estrutural (3), botão Calcular e Quadro de resultados.

Figura 6 - Janela inicial do HCPF.



The screenshot shows the initial window of the HCPF program. It is divided into several sections:

- 1. Modo de vibração:** Includes fields for 'Frequência (Hz)' (set to 2), 'Direção da vibração' (set to Vertical), 'Harmônico' (set to 1º harmônico), 'Componente P (N)' (set to 200), and 'Coeficiente de redução  $\psi$ ' (set to 1.00).
- 2. Dados da passarela:** Includes fields for 'Largura da passarela (m)' (1.8), 'Vão da passarela (m)' (20), 'Área da passarela (m²)' (36.0), 'Massa da passarela (kg)' (12000), 'Densidade linear da passarela (kg/m)' (600), and 'Massa do pedestre (kg)' (80).
- 3. Amortecimento estrutural:** Includes dropdown menus for 'HIVOSS' and 'SÉTRA', both set to 'Selecionar'.
- 4. Botão Calcular:** A button labeled 'Calcular'.
- Quadro de resultados:** A large empty box at the bottom of the window, outlined in red, intended for displaying the calculation results.

O primeiro passo que deve ser realizado pelo usuário é informar ao programa os dados correspondentes às características de vibração que se deseja avaliar quanto ao conforto, especificamente o valor da frequência, a direção e o harmônico da vibração em questão, conforme Figura 7. Automaticamente, são identificados os valores da componente P, em Newtons, e do coeficiente  $\psi$ , parâmetro relacionado ao risco de ressonância associado a intervalos de frequência da estrutura, ambos correspondentes aos dados do modo de vibração informados nesta etapa.

Figura 7 - Quadros 1 e 2

a. Quadro 1: Modo de vibração.

Modo de vibração	
Frequência (Hz)	2
Direção da vibração	Vertical
Hamônico	1º harmônico
Componente P (N)	280
	280
Coefficiente de redução psi	1,00
	1,00

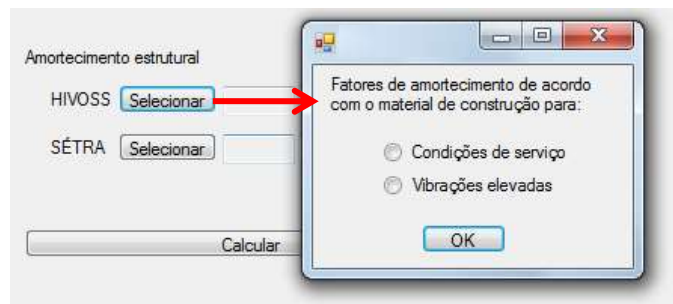
b. Quadro 2: Dados da passarela.

Dados da passarela	
Largura da passarela (m)	1,5
Vão da passarela (m)	20
Área da passarela (m²)	30,0
Massa da passarela (kg)	12000
Densidade linear da passarela (kg/m)	600
Massa do pedestre (kg)	80

Em seguida, no grupo correspondente aos dados da passarela (ver Figura 7), é necessário informar as características geométricas, largura e vão, bem como a massa da estrutura e a massa do pedestre (média da massa para o caso de vários pedestres).

Agora, resta apenas informar o amortecimento estrutural para programa antes de solicitar o cálculo. Para cada guia prático de projeto, HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006), há um botão “Selecionar” que direciona o usuário, ao clicar, para janelas de seleção do valor do amortecimento da estrutura a partir de uma tabela de correlação com diferentes tipos de materiais da construção civil. Salienta-se que, para o guia HIVOSS (2008), há uma janela intermediária para especificação das condições de vibração, se de serviço ou se elevadas (ver Figura 8).

Figura 8 - Quadro 3: Amortecimento estrutural. Seleção HIVOSS (2008).



A janela com valores de amortecimentos estruturais correlacionados com tipos de materiais será mostrada conforme o caso, para vibrações em condições de serviço, Figura 9, e para vibrações elevadas, a Figura 10.

Figura 9 - Janela de seleção do amortecimento estrutural para vibrações em condições de serviço, HIVOSS.

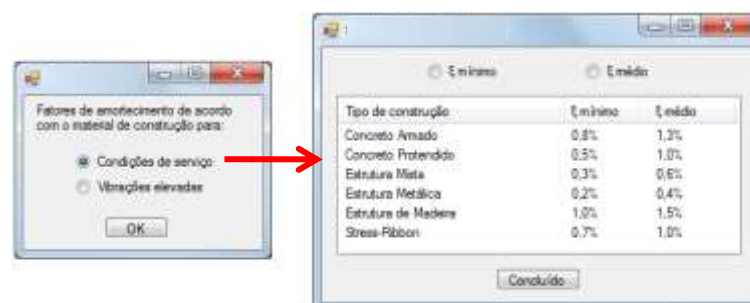
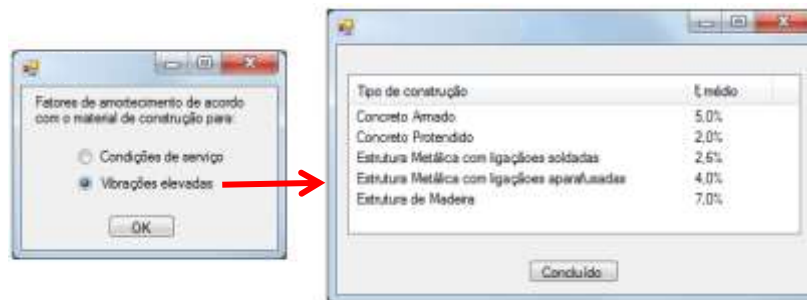


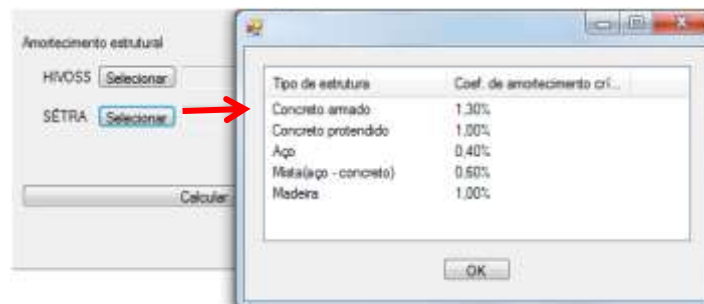
Figura 10 - Janela de seleção do amortecimento estrutural para vibrações elevadas, HIVOSS (2008).



Destaca-se que os valores de amortecimento estrutural em função do material foram extraídos diretamente de cada guia prático de projeto, HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006), e dispostos de forma inalterada ao usuário do programa ANÉSI buscando facilitar a seleção do valor apropriado.

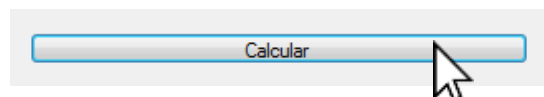
Para seleção dos valores de amortecimento estrutural do guia SÉTRA (2006), uma janela com os valores relacionados aos materiais é exibida diretamente sem etapas ou janelas intermediárias, e o procedimento de escolha é análogo, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Quadro 3: Amortecimento estrutural. Seleção SÉTRA (2006).



Após todas essas etapas, ou seja, depois de informar todos os dados referentes ao modo de vibração da estrutura, dimensões, massa, massa do pedestre e o amortecimento da passarela o usuário pode, finalmente, acionar o botão “Calcular”, de acordo com a Figura 12.

Figura 12 - Quadro 4: botão “Calcular”.



O procedimento de cálculo do programa HCPF está totalmente de acordo com as diretrizes dos guias HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006) e, a partir das informações fornecidas pelo usuário sobre a estrutura da passarela, o número equivalente de pedestres seguido da carga dinâmica são calculados. Por fim, determina-se a aceleração na estrutura, identificando-se o intervalo a qual pertence, segundo os guias, e classificando-se, finalmente, a passarela quanto ao conforto humano especificamente para o modo de vibração informado no quadro 1 (Figura 7). Os resultados são dispostos numa tabela na qual cada linha representa uma classe de tráfego, agrupadas por guia, e cada coluna exhibe cada parâmetro calculado, identificado e/ou classificado.



Figura 13 - Quadro de resultados.

Classe de tráfego	Densidade (pedestres/m <sup>2</sup> )	Densidade de pedestres (kg/m <sup>2</sup> )	Densidade total (kg/m <sup>2</sup> )	Req. ped.	Carga dinâmica	Carga generalizada	Massa modal	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	Intervalo	Conforto
<b>HIVOS</b>										
TC1	0,5	60,00	660,00	0,09	24,69	471,56	6600,00	8,93	a ≥ 2,5	Inconfortável
TC2	0,2	24,00	324,00	0,06	15,62	290,24	3240,00	5,97	a ≥ 2,5	Inconfortável
TC3	0,5	60,00	660,00	0,09	24,69	471,56	6600,00	8,93	a ≥ 2,5	Inconfortável
TC4	1	120,00	720,00	0,34	94,57	1806,22	7200,00	31,36	a ≥ 2,5	Inconfortável
TC5	1,5	180,00	780,00	0,41	115,83	2212,18	7800,00	35,45	a ≥ 2,5	Inconfortável
<b>SÉTRA</b>										
Classe I	1	120,00	720,00	10,13	94,57	-	-	31,36	a ≥ 2,5	Inconfortável
Classe II	0,8	96,00	696,00	3,35	31,23	-	-	10,71	a ≥ 2,5	Inconfortável
Classe III	0,5	60,00	660,00	2,61	24,69	-	-	8,93	a ≥ 2,5	Inconfortável

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa apresenta a iniciativa de desenvolvimento e utilização de uma ferramenta gráfica educacional, programa HCPF, de forma a incluir em suas próximas versões melhoramentos para o tema em questão. A implementação de programas dessa natureza está relacionada a um dos principais aspectos motivacionais no desenvolvimento de novos aplicativos para o ensino de Engenharia por parte de alunos, de graduação e pós-graduação, e professores da Faculdade de Engenharia da UERJ, FEN/UERJ.

O desenvolvimento desta linha de pesquisa destaca a especial importância referente ao emprego de aplicativos computacionais nos cursos de engenharia e, conseqüentemente, uma forma de permitir aos alunos um melhor e mais eficiente aproveitamento, uma vez que esses passam a visualizar e compreender com mais clareza o comportamento de sistemas estruturais de engenharia, como também dos fenômenos físicos envolvidos, através do processamento de análises, como a do conforto, com mais celeridade.

A experiência didática, sem sombra de dúvida, com o emprego dessas ferramentas computacionais, com base em interfaces gráficas bastante amigáveis, faz com que os alunos se sintam mais motivados para estudar e discutir conceitos e assuntos referentes às disciplinas de graduação e pós-graduação em engenharia, o que torna o aprendizado mais dinâmico, interativo e eficiente. Ademais, aplicativos computacionais como o HCPF aliados a guias simplificados de projeto como HIVOS (2008) e SÉTRA (2006) orientam os projetistas de forma simples e eficiente, no que se refere ao comportamento dinâmico de passarelas de pedestres, quando submetidas à ação dinâmica do caminhar humano, principalmente levando-se em conta a ausência de normas nacionais acerca deste tema. Portanto, no âmbito técnico da dinâmica estrutural, é altamente recomendável pelos autores o uso desses guias simplificados de projeto, principalmente com o auxílio de aplicativos como o HCPF, na prática corrente de projeto, visando evitar problemas com altos níveis de vibrações em situações abrangendo desde o desconforto do usuário até o risco à segurança estrutural.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país, CAPES, CNPq e FAPERJ, que possibilitaram a realização deste trabalho de pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

BACHMANN, H.; AMMANN, W. *et al.* Vibrations in structures induced by man and machines. Basel (Switzerland): Institut für Baustatik und Konstruktion, Birkhäuser, 1995.

HIVOSS: Human Induced Vibration of Steel Structures. Design of Footbridges Guideline. Research Fund for Coal and Steel, 2008.

MENDES, J.P. Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

SÉTRA: Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridge Under Pedestrian Loading, Technical guide. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Paris, França, 2006.

SILVA, I.A.R. Monitoração experimental e modelagem numérica para avaliação do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura sobre a resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres (Em desenvolvimento). Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2018.

## **DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL PROGRAM FOR THE ENGINEERING EDUCATION AND EVALUATION OF THE HUMAN COMFORT LEVELS OF PEDESTRIAN FOOTBRIDGES**

**Abstract:** *This research work presents as main objective the development of an engineering education methodology, based on the use of a computational program to be utilised for teaching in the undergraduate and graduate courses in Civil Engineering, as well as by professional designers of structures. Thus, the HCPF program was developed to allow the structural analysis and evaluation of the human comfort levels of pedestrian footbridges, according to the design methodologies proposed in the international guidelines HIVOSS [Human Induced Vibration of Steel Structures] and SÉTRA [Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridges under Pedestrian Loading], aiming the engineering education based on a practical and automated way. The development of computational applications is relevant, in order to allow the students of the Faculty of Engineering of the University of the State of Rio de Janeiro, FEN/UERJ, to understand all the physical parameters involved with the behaviour and the structural analysis; and, in particular, the evaluation of human comfort levels on the design of pedestrian footbridges. This was the main motivation for the development of this computational software, in the scope of the Postgraduate Program in Civil Engineering, PGECIV/FEN/UERJ, aiming to stimulate and motivate undergraduate and graduate students to study and analyse this type of problem.*

**Keywords:** *Engineering education, Pedestrian footbridges, Human comfort.*