

AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO DE PASSARELAS MISTAS COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Nelson Luiz de Andrade Lima¹

José Guilherme Santos da Silva²

Francisco José da Cunha Pires Soeiro²

Luiz Biondi Neto³

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima⁴

Resumo: Atualmente, as passarelas de pedestres têm sido construídas a partir de sistemas estruturais cada vez mais arrojados com base no emprego de novos materiais e tecnologias. Este procedimento tem gerado sistemas estruturais bastante esbeltos e os estados limites últimos e de utilização que norteiam o dimensionamento tem sido modificados. Uma consequência desta tendência de projeto diz respeito a um aumento considerável dos problemas referentes à vibração. Esta foi a principal motivação para o desenvolvimento de uma metodologia de projeto para avaliar o conforto humano em passarelas de pedestres. Este trabalho apresenta uma contribuição associada à avaliação do conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto) com base em técnicas de inteligência computacional. Para tal utiliza-se uma estratégia de solução baseada em algoritmos genéticos (AG). Os AGs são considerados uma excelente ferramenta a ser utilizada na resolução de problemas de otimização. Para tal são considerados critérios de avaliação do conforto humano recomendados para o projeto estrutural de passarelas de pedestres de acordo com recomendações internacionais e normas de projeto. Assim sendo, esta investigação apresenta um estudo sobre a obtenção do máximo vão admissível a ser empregado no projeto de passarelas mistas (aço-concreto), objetivando atender a critérios de conforto humano.

Palavras-chave: Conforto humano; Passarelas de pedestres; Algoritmos genéticos.

Abstract: Nowadays, the pedestrian footbridges have been constructed with increasingly daring structural systems by using newly developed materials and technologies. This fact has generated very slender structural footbridges and, consequently, changed the serviceability and ultimate limit states associated to their design. A direct consequence of this design trend is a considerable increase of structural vibration problems. This was the main motivation for the development of a design methodology to evaluate the footbridge user's comfort. This paper presents a contribution associated to the evaluation of the human comfort of composite footbridges (steel-concrete) based on techniques of computational intelligence. The genetic algorithms (GA) were used as a solution strategy. The GA is considered an excellent tool to be applied in the solution of optimisation problems. The human comfort criteria currently used on the composite footbridges design were considered based on international recommendations and design standards. This investigation presents the results of a study where the main objective is to obtain acceptable span lengths to composite footbridges in order to satisfy the human comfort criteria.

Keywords: Human comfort; Pedestrian footbridges; Genetic algorithms.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV/UERJ, E-mail: nelson_lima@hotmail.com

² Departamento de Engenharia Mecânica, PGECIV/FEN/UERJ, E-mail: jgss@uerj.br, soeiro@uerj.br

³ Departamento de Engenharia Eletrônica, PGECIV/FEN/UERJ, E-mail: luizbiondi@terra.com.br

⁴ Departamento de Estruturas e Fundações, PGECIV/FEN/UERJ, E-mail: lucianolima@uerj.br

1 INTRODUÇÃO

Com base na evolução das técnicas de engenharia nos últimos anos as estruturas das passarelas tornaram-se cada vez mais leves e esbeltas. A evolução da própria indústria da construção civil em relação à concepção arquitetônica vem considerando as estruturas como verdadeiras obras de arte nas quais os projetos são desenvolvidos por grupos de trabalho formados por engenheiros, arquitetos e inclusive escultores.

Atualmente, existe uma maior exigência dos padrões de qualidade de construção e de conforto humano por parte das normas técnicas vigentes. Dentro deste contexto, os avanços tecnológicos da indústria do aço aumentaram em muito o potencial deste material como matéria-prima da construção civil e da arquitetura. Assim sendo, a opção pelo uso do aço em estruturas de passarelas trouxe algumas vantagens importantes para que o projeto fosse bem sucedido.

No caso específico de passarelas para pedestres, a estrutura pode até ter caráter temporário, pois a modulação do aço possibilita rápida montagem e desmontagem, permitindo a transferência da passarela para outros locais, bastando para isso apenas algumas adaptações.

Com o emprego do aço, o arquiteto pode ter um maior controle de quanto tempo e material irá gastar, pois a obra pode ser feita sob qualquer condição de tempo e temperatura. Esse aspecto é essencial para o projeto de uma passarela, que muitas vezes é erguida em locais onde já existe um sistema viário que não pode ter o tráfego interrompido em função de uma obra. Além de todas essas vantagens, uma passarela de aço pode vir a ser bela como uma escultura transformando-se assim, em um novo ponto turístico para a cidade onde a mesma foi construída.

Diversos são os exemplos de passarelas existentes ao redor do mundo. Um exemplo bastante conhecido diz respeito à passarela sobre o Rio Tâmis

em Londres, mostrada na Figura 1. Esta passarela possui dois pilares apoiados no leito do rio sendo constituída de três vãos principais de 81m, 144m e 108m, respectivamente, com um comprimento total de 325m. O piso é feito em alumínio e apresenta 4m de largura. Os oito cabos de sustentação do sistema estrutural são suspensos e tensionados de forma a suportar uma força de 2000tf aplicada contra o corpo do pilar, o que corresponde ao suficiente para apoiar uma carga de trabalho de 5000 pedestres sobre a passarela. Porém, esta estrutura precisou sofrer algumas intervenções tendo em vista que apresentou problemas de vibração excessiva logo no dia de sua inauguração.

Um outro exemplo a ser citado considera uma estrutura utilizada na passarela de pedestres situada na cidade de Curitiba na empresa Natura Indústria e Comércio de Cosméticos com um vão de 35m e largura variando entre 3,2m a 5,2m, de acordo com a Figura 2. O vão máximo é de 30m e foram utilizados perfis de aço do tipo I com aço ASTM A36 e perfis tubulares com aço ASTM A53 resultando em um peso total da estrutura de 40tf.

Uma outra estrutura bastante interessante diz respeito à passarela de pedestres apresentada na Figura 3, onde foi instalada uma esteira rolante para facilitar a locomoção dos pedestres. Esta passarela encontra-se situada no Shopping Center Mueller na cidade de Curitiba. Para conforto dos visitantes, foi instalado nesta estrutura um equipamento de ar-refrigerado. A estrutura possui um comprimento total de 61m, largura de 7,10m (eixos de pilares da sustentação), 4,20m de largura interna com vão máximo de 25m. Foram utilizados aços ASTM A36, ASTM A572 e ASTM A570, resultando em um peso total da estrutura de 53,48tf.

Cabe ressaltar, ainda, que ao longo dos últimos anos, devido a um aumento sensível no índice de esbeltez dos elementos estruturais (lajes de concreto, vigas e colunas de aço), que compõem as passarelas mistas (aço-concreto), os

estados limites de utilização, correspondentes a vibrações excessivas têm sido constantemente violados, o que indica que os critérios de conforto humano não tem sido utilizados de forma correta, por parte dos projetistas de estruturas.



Figura 1 - Passarela sobre o Rio Tamisa em Londres



Figura 2 - Passarela na cidade de Cajamar, São Paulo, Brasil



Figura 3 - Passarela na cidade de Curitiba, Paraná, Brasil

Um projeto estrutural, em consonância com modernas técnicas construtivas, necessita considerar além de todos estes detalhes, mencionados anteriormente, o conforto humano dos pedestres que se utilizam da obra de arte. ENGEVISTA, v. 10, n. 1, p. 59-70, junho 2008

Baseado neste fato, o presente trabalho apresenta uma análise sobre as passarelas de pedestres, no que tange aos padrões de conforto relacionados às atividades humanas, tendo como referência as prescrições do manual de projetos do AISC - American Institute of Steel Construction (MURRAY *et al*, 2003).

Foram considerados os critérios recomendados para o projeto estrutural segundo os quais as passarelas submetidas às excitações provenientes do caminhar humano devem gerar acelerações limitadas pelas recomendações fornecidas pela ISO - International Standards Organizations (ISO 2631/2, 1989), como ilustrado na Figura 4.

A Figura 4 apresenta duas curvas que foram utilizadas na presente investigação: uma curva que se refere às passarelas internas e a outra associada às passarelas externas. O projeto dessas estruturas é então desenvolvido de forma que a razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade (a_0/g) esteja dentro de limites toleráveis, sendo 1,5% para o caso de passarelas internas e 5% para o caso de passarelas externas (ISO 2631/2, 1989).

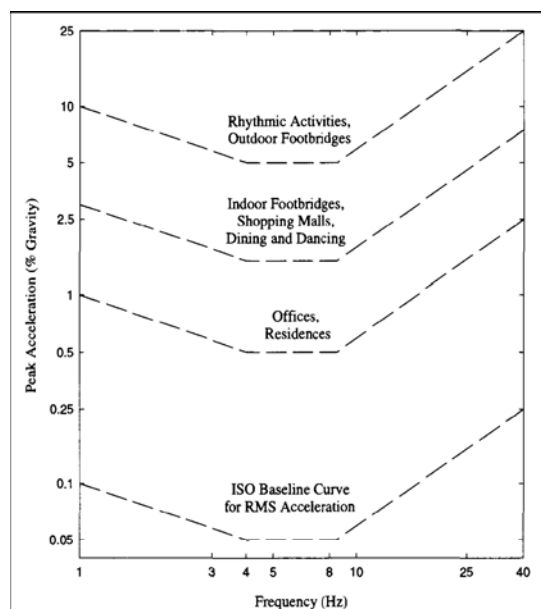


Figura 4 - Acelerações de pico recomendadas para condições satisfatórias de conforto humano (ISO 2631/2, 1989)

Assim sendo, baseando-se nos critérios de projeto propostos pelo AISC (MURRAY *et al*, 2003) e pela norma ISO (ISO 2631/2, 1989), este trabalho de pesquisa apresenta um estudo acerca da determinação do vão máximo para passarelas mistas (aço-concreto) possível de ser utilizado em projeto, a partir do emprego de perfis de aço do tipo I, correntemente utilizados em seções transversais desse tipo de estrutura.

Objetiva-se, também, auxiliar os projetistas estruturais, no que tange a verificação dos estados limites últimos e de serviço das passarelas as quais, como citado anteriormente, apresentam-se cada vez mais esbeltas comprometendo o conforto humano dos seus usuários.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Dentre as várias soluções estruturais possíveis para passarelas, as estruturas mistas (aço-concreto) representam uma solução bastante eficaz sendo caracterizada pela utilização de um perfil de aço que suporta uma laje de concreto apoiada na mesa superior da viga metálica, como ilustrado na Figura 5. A união destes dois materiais é feita através da utilização de conectores de cisalhamento que podem ser do tipo pino, U ou mesmo perfobond.

Neste sistema misto, reduções de peso da ordem de 20% a 40% podem ser atingidas em sistemas convenientemente dimensionados, tirando-se partido dos materiais básicos componentes, que são o aço e o concreto. No limite, o sistema atingirá o ponto de máxima eficiência quando a linha neutra estiver localizada em uma posição tal que permita que as tensões de compressão na flexão sejam resistidas apenas pelo concreto e o perfil de aço seja responsável por resistir às tensões de tração.

As mais simples e econômicas ligações de apoio de vigas, como as cantoneiras, de alma ou chapa simples, têm pouca rigidez à flexão. Sendo assim torna-se mais conveniente assumir que as vigas construídas com este tipo de ligação sejam calculadas como simplesmente

apoiadas. Tais vigas possuem algumas vantagens em relação às calculadas como contínuas, conforme citado por JONHSON (1994):

a) Normalmente, apenas uma pequena parte da alma fica sujeita à compressão e a mesa comprimida é travada pela laje evitando-se assim, que a resistência da viga não seja limitada pela flambagem global (lateral) ou local do perfil de aço;

b) A alma do perfil fica sujeita a estados de tensão menos severos possibilitando assim, a execução de furos para a passagem de dutos;

c) Os esforços de flexão e cisalhamento são estaticamente determinados e não são influenciados pela fissuração, retração ou deformação lenta do concreto;

d) Não existe uma interação entre o comportamento de vãos adjacentes;

e) Os momentos transmitidos aos pilares são baixos ou quase nulos;

f) A fissuração do concreto é menor, já que está sujeito à tração apenas nos apoios (devido à tendência de continuidade);

g) Tanto a análise estrutural quanto o dimensionamento destas vigas são rápidos e bastante simples.

No que diz respeito ao dimensionamento de uma passarela com seção transversal típica, em estrutura mista, laje em concreto armado e vigas em perfis metálicos soldados, conforme mostrado na Figura 5, é possível escolher-se um tipo de perfil adequado, bastando que se calcule na seguinte ordem, a razão entre a sobrecarga e a carga total, a altura mínima do perfil de aço, o deslocamento admissível para o sistema estrutural, a carga total e, finalmente, o momento fletor atuante (QUEIROZ *et al*, 2001).

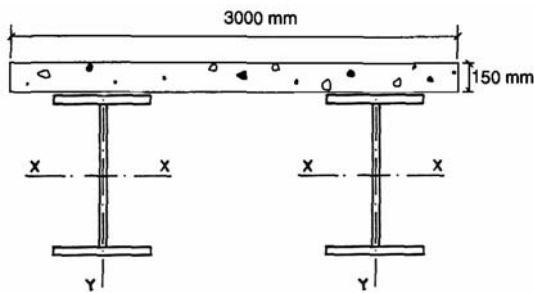


Figura 5 - Seção transversal típica de uma passarela em estrutura mista (aço-concreto)

Uma vez estabelecida a geometria da passarela, a qual deve ser efetivamente resistente aos esforços atuantes, torna-se possível então, calcular as suas características dinâmicas, sendo que para o caso investigado neste trabalho a grandeza de maior relevância será a razão obtida entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade.

Assim considerando e efetuando-se o cálculo para cada perfil de aço disponível no mercado é possível calcular-se o vão máximo admissível, para o qual a aceleração de pico da passarela estaria dentro dos limites aceitáveis (ISO 2631/2, 1989). Em seqüência, a partir destas duas informações, efetua-se a escolha de um perfil metálico específico que simultaneamente resista aos esforços atuantes e, também, não permita a geração de vibrações indesejáveis provocadas pelo caminhar de pedestres.

3. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DAS PASSARELAS MISTAS

Para o dimensionamento das passarelas mistas (aço-concreto), torna-se necessário definir algumas variáveis e equações matemáticas necessárias na realização deste procedimento. Deste modo, a expressão (1) fornece a razão entre a aceleração de pico calculada e a aceleração da gravidade (a_p/g) (MURRAY *et al*, 2003).

Evidentemente, o resultado fornecido por esta relação deve ser menor do que a razão entre a aceleração limite, Figura 4, e a aceleração da gravidade

(a_0/g). Vale relembrar que a_0/g é igual a 1,5% para passarelas internas e 5% para passarelas externas (ISO 2631/2, 1989). Neste estudo, a taxa de amortecimento modal, β , é tomada igual a 1,0 e a força constante, p_0 , é adotada igual a 0,41kN (MURRAY *et al*, 2003) e a_0 representa a aceleração máxima limite da referida norma

$$\frac{a_p}{g} = \frac{p_0 \cdot \exp(-0,35 \cdot f_n)}{\beta \cdot W_j} \leq \frac{a_0}{g} \quad (1)$$

O peso próprio total a ser considerado nas vigas de aço é dado pela equação (2), onde w_j representa o peso em kg por metro linear da viga mais o peso da laje de concreto e a variável L_j corresponde ao comprimento adotado (vão teórico da passarela). O peso próprio total por metro linear a ser considerado na viga metálica é então fornecido pela equação (3). Na mesma equação, as grandezas b_{laje} e e_{laje} representam a largura e a espessura da laje de concreto, respectivamente.

$$W_j = w_j \times L_j \quad (2)$$

$$w_j = \frac{b_{laje} \cdot e_{laje}}{2} \cdot 25 \cdot 10^{-6} + p_{pviga} \cdot 10^{-2} \left(\frac{KN}{m} \right) \quad (3)$$

A frequência fundamental do sistema estrutural é calculada mediante o emprego da equação (4), em que o deslocamento, Δ_j , é dado pela equação (5), onde E_s representa o módulo de elasticidade do aço, considerado nesta investigação igual a $2,05 \cdot 10^5$ MPa, e I_j representa o momento de inércia da seção composta (inércia do perfil de aço isolado mais inércia da laje de concreto isolada), obtido a partir das equações (6) a (8).

$$f_n = 0,18 \cdot \sqrt{\frac{g}{\Delta_j}} = \sqrt{\frac{9,806}{\Delta_j}} \quad (4)$$

$$\Delta_j = \frac{5 \cdot w_j \cdot L_j^4}{384 \cdot E_s \cdot I_j} \quad (5)$$

$$I_j = I_{pi} + I_{li} \quad (6)$$

$$I_{pi} = 2 \left[I_{perfil} 10^4 + A_{perfil} 10^2 \left(\frac{h_{perfil}}{2} \right) y^2 \right] \quad (7)$$

$$I_{li} = \frac{b_{laje}}{6,17} \cdot \frac{e_{laje}^3}{12} + \frac{b_{laje}}{6,17} \cdot e_{laje} \cdot \left(\frac{e_{laje}}{2} + y \right)^2 \quad (8)$$

Finalmente, a equação (9) calcula a distância do centro de gravidade do conjunto, em relação à face superior da laje de concreto.

$$y = \frac{2 \cdot A_{perfil} \cdot 10^{-2} \cdot \frac{h_{perfil}}{2} - \frac{b_{laje}}{6,17} \cdot e_{laje} \cdot \frac{e_{laje}}{2}}{2 \cdot A_{perfil} \cdot 10^{-2} + \frac{b_{laje}}{6,17} \cdot e_{laje}} \quad (9)$$

4. ALGORITMOS GENÉTICOS

Durante os últimos trinta anos tem crescido o interesse dos engenheiros pela utilização de técnicas de inteligência computacional na solução de problemas cada vez mais complexos, de difícil solução por meios convencionais.

De acordo com as diversas técnicas de inteligência computacional disponíveis, os AGs são considerados como sendo uma excelente ferramenta a ser utilizada na resolução de problemas de otimização.

Os AGs são representados por uma família de modelos computacionais inspirados no princípio “Darwiniano” de evolução das espécies e na genética.

De modo geral trata-se de algoritmos não determinísticos que fornecem um mecanismo de busca paralela e adaptativa. Este mecanismo é obtido a partir de uma população de indivíduos composta de várias soluções possíveis para o problema, representados por cromossomos (palavras binárias, reais, vetores, matrizes, etc.), cada um associado a uma aptidão (avaliação da solução do problema) e que estão submetidos a um processo de evolução (*seleção, crossover e mutação*) por vários ciclos até convergir para melhor solução do problema (MICHALEWICZ, 1998).

ENGEVISTA, v. 10, n. 1, p. 59-70, junho 2008

A Figura 6 apresenta um diagrama em blocos que sintetiza a idéia fundamental de um AG.

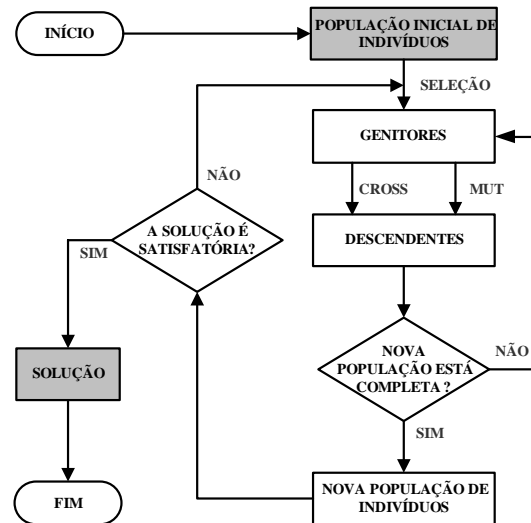


Figura 6 - Diagrama genérico de um AG.

Assim, o primeiro passo é gerar aleatoriamente a população inicial de indivíduos. Essa população é composta de cromossomos (indivíduos) que são soluções viáveis do problema e que ao longo do processo evolutivo serão melhoradas.

Para cada indivíduo da população é calculada a aptidão que define a capacidade do indivíduo sobreviver e gerar descendentes nas gerações seguintes. Usando-se esse parâmetro é feita a seleção de indivíduos denominados de genitores e que irão sofrer as operações de *crossover* e *mutação*, dentre outras, visando formar uma nova população de indivíduos com aptidão média melhor do que a obtida na população anterior.

O processo é repetido geração a geração, podendo-se preservar os melhores indivíduos da população anterior na nova população (*elitismo*). Quando a solução atingir certo valor que, praticamente, não mais se altere nas gerações seguintes o processo é finalizado (MICHALEWICZ, 1998).

As principais características que distinguem os AGs das demais técnicas de otimização são as seguintes:

- AG trabalha com a codificação dos parâmetros do problema e não com os próprios parâmetros;
- AG pesquisa a solução ótima partindo de uma população de soluções viáveis e não processa apenas uma única solução;
- AG explora somente o valor da aptidão das soluções candidatas, guiando a pesquisa em direção ao mínimo global (solução ótima). Não depende de informação adicional, como por exemplo, relativas às derivadas;
- AGs são estocásticos, não dependem de regras de transição determinísticas, usam regras probabilísticas.

Um fato que deve ser visto com cautela, está ligado a possibilidade de, em certos casos, o algoritmo convergir para um mínimo local. Para evitar esse problema, basta rodar várias vezes e comparar os resultados, conforme foi feito nesse artigo.

Finalmente, é importante salientar o fato dos AGs serem facilmente convertidos em programas a serem e executados em máquinas paralelas. Nesse

Para as vigas de aço foram utilizados perfis soldados (Série VS), como mostrados na Figura 7, cujas propriedades geométricas e mecânicas consideradas foram as seguintes:

d - altura do perfil
b_f - largura da mesa
t_w - espessura da alma
t_f - espessura da mesa
e_c - espessura do cordão de solda
A - área total
P - peso do perfil por metro linear
U - área de pintura por metro linear
I_t - Momento de inércia à torção

Z_x - Módulo de resistência plástico, relativo ao eixo X-X
Z_y - Módulo de resistência plástico, relativo ao eixo Y-Y

caso, mesmo que sejam realizadas várias rodadas do algoritmo, o tempo de execução torna-se extremamente rápido.

5. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Para a formulação do problema apresentado nesta investigação, deseja-se obter o maior vão possível a ser utilizado para cada perfil de aço, encontrado comercialmente, de forma a que as passarelas de pedestres não apresentem problemas estruturais associados a vibrações excessivas, os quais caracterizam uma situação de desconforto humano.

Na realidade, tal situação consiste em um problema de otimização no qual se procura limitar a razão entre a aceleração de pico calculada, a_p , e a aceleração da gravidade, g , (a_0/g é o valor mais próximo de 1,5% para passarelas internas e de 5% para passarelas externas), em função do vão da estrutura, L_j (L_j : variável de projeto). A equação (10), dá uma idéia da complexidade do problema, justificando o uso de AG.

A ferramenta computacional utilizada para programar o AG foi o Evolver 4.0.5 (EVOLVER, 2001), que funciona como *plugin* para o Microsoft Excel[©] (EXCEL, 2000).

r_t - raio de giração relativo a Y-Y
I_x - Momento de inércia em relação ao eixo X-X
I_y - Momento de inércia em relação ao eixo Y-Y
W_x = 2 I_x - Módulo de resistência elástico da seção em relação ao eixo X-X
W_y = 2 I_y - Módulo de resistência elástico da seção em relação ao eixo Y-Y
r_x - Raio de giração em relação ao eixo X-X
r_y - Raio de giração em relação ao eixo Y-Y

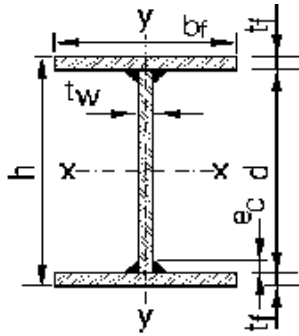


Figura 7 - Seção transversal genérica de um perfil metálico soldado (Série VS)

$$\frac{a_p}{g} = \frac{p_0 \cdot \exp(-0,35) \cdot \left(\frac{9.806}{5 \cdot \left(\frac{l_1 \cdot e_1}{2} \cdot 25 \cdot 10^{-6} + p_p \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{KN}}{\text{m}} \right) \right) \cdot L_j^4} \right)}{\beta \cdot \left[L_j \cdot \left(\frac{l_1 \cdot e_1}{2} \cdot 25 \cdot 10^{-6} + p_p \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{KN}}{\text{m}} \right) \right) \right]} \cdot \sqrt{384 \cdot E_s \cdot \left[\left(2 \cdot \left[I_p \cdot 10^4 + A_{\text{perf}} \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{h_p}{2} \right) \cdot y^2 \right] \right) + \left(\frac{l_1}{6,17} \cdot \frac{e_1^3}{12} + \frac{l_1}{6,17} \cdot e_1 \cdot \left(\frac{e_1}{2} + y \right)^2 \right) \right]} \quad (10)$$

Os dados de entrada considerados na análise foram os seguintes: largura da laje (b_{laje}) e a espessura da laje de concreto (e_{laje}) respectivamente, além das propriedades referentes a cada tipo dos perfis de aço usados nessa investigação.

Restrições de desigualdades foram introduzidas visando estabelecer os limites máximos exigidos para as principais variáveis da passarela, tal como as fechas admissíveis.

A limitação das acelerações recomendadas pela **ISO - International Standards Organizations** (ISO 2631/2, 1989) é outro parâmetro que também deve ser considerado.

Nesse sentido é importante destacar que, para obter resultados confiáveis no processo de busca, é necessária inclusive a imposição de limitações quanto ao comprimento máximo do vão.

Também foram definidas células alvos que contêm os resultados do modelo referentes às variáveis as quais se deseja minimizar, maximizar ou estabelecer um valor específico.

Em nossa ferramenta, a *taxa de crossover* pode ser estabelecida entre 0,01 e 1,00 e reflete a probabilidade de que os descendentes contêm uma mistura de informação da geração prévia dos genitores. Assim, uma taxa de 0,5 significa que um descendente contém

basicamente 50 % dos valores de sua variável do primeiro genitor e o restante proveniente do genitor seguinte. Em nossa investigação a *taxa de crossover* foi de 80 %.

No que tange a *taxa de mutação* esta pode ser ajustada entre 0,0 e 1,0 e reflete a probabilidade de que os descendentes contêm alguns valores *genes* aleatórios (ajuste fino).

A mutação provou ser uma força poderosa no algoritmo genético: é vital à manutenção de uma população diversificada de indivíduos, prevenindo a população de uma formação demasiadamente rígida, incapaz de adaptar-se a um ambiente dinâmico. No nosso caso a taxa de mutação ficou entre 10 e 20 %.

Trabalhamos com populações de 50 indivíduos.

Finalmente, a ferramenta fornece dois vãos máximos para cada perfil de aço, onde o primeiro valor corresponde a passarelas externas ($a_p/g \leq 5,0\%$) e o outro está associado a passarelas internas ($a_p/g \leq 1,5\%$) (ISO 2631/2, 1989).

Os valores obtidos com a utilização da equação (1), ilustrados na Figura 8, permitem que se acompanhe a evolução dos vãos máximos obtidos para cada perfil metálico, servindo como um pré-dimensionamento para as passarelas nas

quais as vibrações provocadas pelo caminhar humano certamente estarão dentro dos padrões de conforto considerados por normas de projeto (ISO 2631/2, 1989).

Por outro lado, antes da realização do processamento através do AG é conveniente analisar o comportamento da curva expressa pela variação da razão entre a aceleração de pico estimada e a aceleração da gravidade (a_p/g), em função da variação do valor do vão, conforme ilustrado na Figura 8.

A Figura 8 considera um perfil do tipo VS250x28 com uma tensão de escoamento de 250MPa.

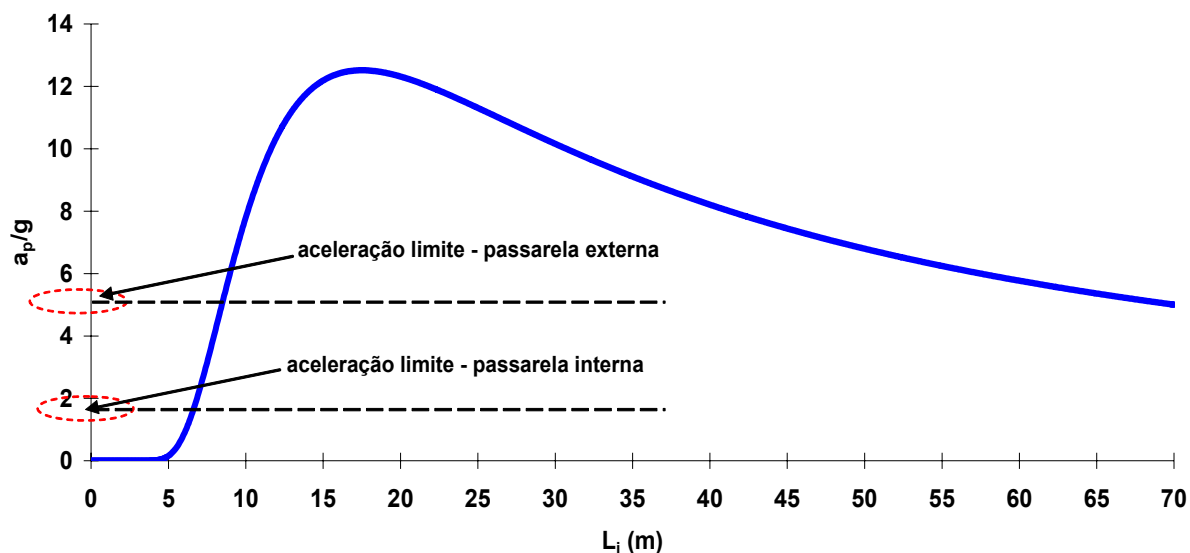
O aspecto geral da curva denota que existe apenas um máximo global na presente análise e que dois comprimentos diferentes de vãos podem gerar o mesmo valor de a_p/g .

Entretanto, deve-se destacar que o tipo de solução estrutural em estudo não é viável, por questões econômicas, para comprimentos de vãos superiores a 30m.

Desta maneira, a análise via algoritmos genéticos (AG) pode ser seguramente utilizada, pois não existem máximos locais na função e tal procedimento fica restrito ao trecho da curva de declividade positiva, situado antes do ponto de máximo global.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Utilizando-se a técnica dos AGs foram então obtidos dois valores para os vãos máximos para cada perfil de aço, a saber: o primeiro de forma a atender o limite para passarelas internas ($a_p/g \leq 1,5\%$, ISO 2631/2, 1989).



Outro objetivando atender o limite para passarelas externas ($a_p/g \leq 5,0\%$, ISO 2631/2, 1989), desde o perfil VS250x28 até o perfil VS750x170, totalizando cerca de quarenta perfis diferentes utilizados na análise.

Os resultados obtidos foram agrupados em um gráfico mostrado na Figura 9, em função dos deslocamentos Δ e do tipo de perfil de aço.

Na mesma Figura, pode-se verificar que os últimos valores de deslocamento, mais a direita da figura, gerados para os vãos máximos limitados por $a_p/g < 5,0\%$, limite para passarelas externas (ISO 2631/2, 1989), correspondem a valores da ordem de um vão máximo de 35m, limite para o qual a solução estrutural em estudo ainda se aplica, de forma a atender limites de conforto humano.

Assim sendo, tomando-se por base os valores de vãos obtidos para $a_p/g \leq 5,0\%$, limite para passarelas externas, (ISO 2631/2, 1989) foram efetuados cálculos para os valores limites dos deslocamentos ($\Delta_{\text{máx}} \leq L/350$), (NBR-8800, 1989) e comparados com os valores calculados para a carga permanentes adicionados a carga acidental ($\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$), segundo a metodologia da norma brasileira de estruturas de aço (NBR-8800, 1989). Estas grandezas representam o vão da estrutura (L), o deslocamento devido às ações permanentes (Δ_1), o deslocamento devido aos efeitos de longa duração das ações permanentes (Δ_2) e o deslocamento

devido às ações variáveis (Δ_3), de acordo com a Figura 8.

Foi verificado que para todos os perfis utilizados, os deslocamentos calculados eram maiores do que os valores máximos estabelecidos, indicando que a NBR-8800 (1989) é muito conservadora para ser utilizada em conjunto com os critérios de conforto humano estipulados pela *International Standards Organizations* (ISO 2631/2, 1989).

Considerando-se, agora, as restrições impostas pelas normas européias EUROCODE 3 (2003) e EUROCODE 4 (2002), verifica-se que em uma determinada faixa de perfis, o deslocamento máximo é maior do que o calculado, como apresentado na Figura 9. Para as normas européias EUROCODE 3

(2003) e EUROCODE 4 (2002), o limite para o deslocamento máximo é igual a $L/300$.

Contudo, foi verificado que, a partir do perfil VS500x97 o valor limite de deslocamento foi ultrapassado, indicando que o cálculo deste deslocamento depois da cura do concreto (considerando-se ainda a deformação lenta do concreto para curta e longa duração) é relevante e pode indicar que alguns valores de vãos precisariam ser limitados por este outro critério, de acordo com a Figura 10.

Finalmente, a Figura 11 apresenta o vão máximo permitido para cada perfil de aço utilizado nas passarelas de pedestres mistas (aço-concreto), de forma que sejam atendidas às exigências de conforto humano para passarelas internas e externas, respectivamente.

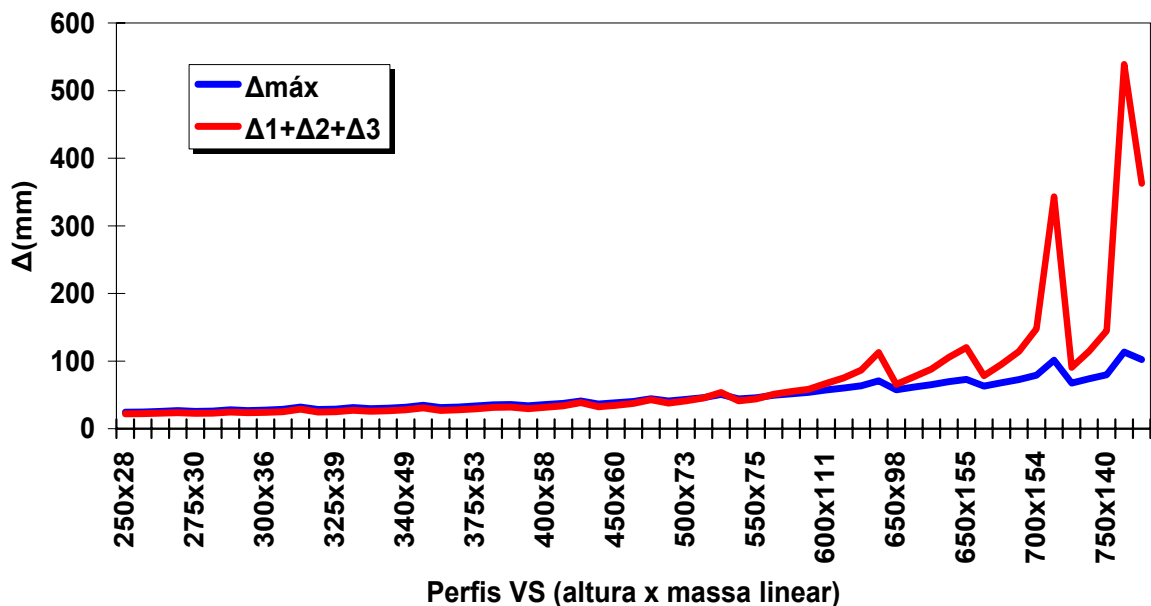


Figura 9 - Deslocamentos obtidos para perfis de aço VS 250x28 até VS 750x168 (NBR-8800, 1989)

Existem ainda mais cinquenta e quatro perfis disponíveis no catálogo do fabricante (perfis VS800x111 ao VS1500x492) (FEM, 2003). Entretanto, como pode ser constatado, os últimos perfis considerados, mais a direita do gráfico (Figura 11) já apresentam vãos livres que tornam a utilização deste tipo de solução estrutural não recomendável, sob o ponto de vista econômico.

Ressalta-se, também, de acordo com os resultados obtidos ao longo deste

estudo, que para um mesmo vão é possível que exista mais de um tipo de perfil metálico que forneça valores semelhantes para a relação (a_p/g). Nesta situação, a escolha do perfil mais indicado para o caso em análise irá depender da combinação dos valores do gráfico, Figura 11, com a massa linear do perfil selecionado a priori em um gráfico

de pré-dimensionamento, como por exemplo, aquele apresentado na Figura 9.

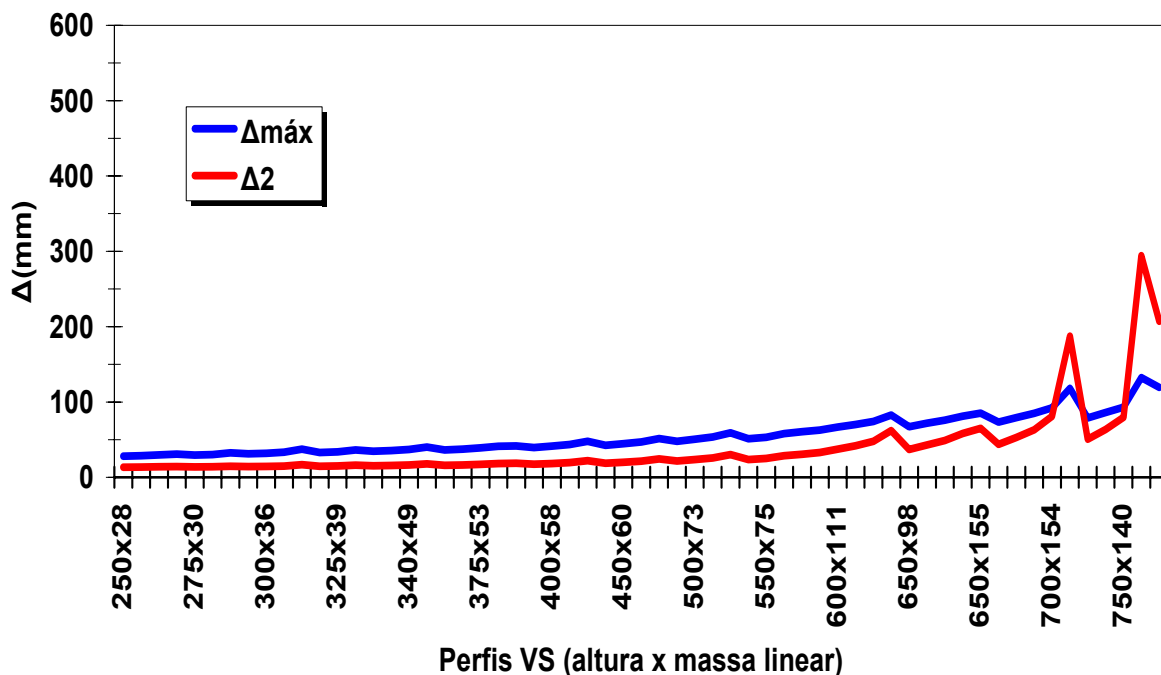


Figura 10 - Deslocamentos obtidos para perfis de aço VS 250x28 até VS 750x168 (EUROCODE 3, 2003) e (EUROCODE 4, 2004)

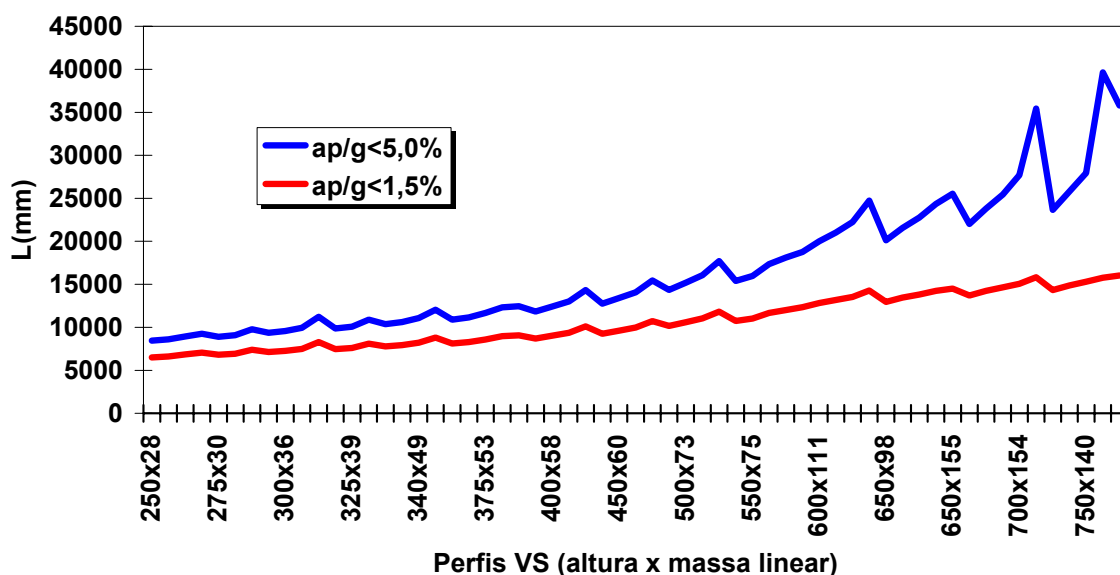


Figura 11 - Vãos máximos limitados pela aceleração limite (ISO 2631/2, 1989) para perfis de aço VS 250x28 até VS 750x168

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta investigação apresenta uma contribuição associada à avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto), com base em técnicas de inteligência computacional. Para tal são utilizadas estratégias de otimização baseadas nos AGs.

Apresenta-se um estudo sobre a obtenção do máximo vão admissível a ser empregado no dimensionamento de perfis de aço do tipo “I”, correntemente utilizados em seções transversais de passarelas mistas (aço-concreto). Assim sendo, são considerados critérios de avaliação do conforto humano recomendados para o projeto estrutural de passarelas de pedestres de acordo com normas internacionais correntes.

Os resultados encontrados no AG, ao longo do presente estudo indicam, com clareza, que a adequação das passarelas de pedestres aos padrões de conforto relacionados às atividades humanas, traduzem-se, basicamente, por restringir a flexibilidade e a deformabilidade do sistema estrutural, a partir de níveis pré-estabelecidos em normas de projeto. Em outras palavras, em termos práticos, isto significa um aumento de custo, no que tange ao emprego de perfis mais pesados, em determinadas situações, objetivando garantir que os critérios de conforto humano sejam atendidos.

Por outro lado, destaca-se que a relação custo-benefício do projeto de uma passarela deve ser cuidadosamente avaliada por parte dos projetistas estruturais, com rigor, de acordo com a adequação dos critérios de conforto humano à realidade brasileira e, bem como, a importância da obra de arte a ser construída.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios, NBR-8800, Rio de Janeiro, 1988.

EUROCODE 3. Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Connections, European Standard: prEN 1993-1-8, Brussels, 2003.

EUROCODE 4. Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. European Standard: prEN 1994-1-1, CEN/TC250/SC4/N259, Brussels, 2002.

FEM - FÁBRICA DE ESTRUTURAS METÁLICAS S.A: Catálogo de Perfis Soldados. Subsidiária da Companhia Siderúrgica Nacional, 2003.

GUIDE TO EVOLVER. The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel. Release 4.0, 2001.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANISATION. Evaluation of Human

Exposure to Whole-body Vibration. Continuous and Shock-induced Vibration in Buildings (1-80Hz), ISO 2631-2, 1989.

JOHNSON, R. P. Composite Structures of Steel and Concrete, Volume 1: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings. Blackweel Scientific Publications, 2nd Edition, 1994.

MICHALEWICZ, Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 3rd Revised and Extended Edition, Springer, 1998.

MICROSOFT[®] EXCEL 2000, Microsoft Corporation, 2000.

MURRAY, T. M., ALLEN, D. E., UNGAR, E. E. Steel Design Guide Series N^o. 11: Floor Vibrations Due to Human Activity, American Institute of Steel Construction, AISC, 2003.

QUEIROZ, G., PIMENTA, R. J., MATA, L. A. C. DA, Elementos de Estruturas Mistas Aço-Concreto, Belo Horizonte, 2001.