

MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA PASSARELA ESTAIADA DE MADEIRA COM GPS E TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO

Ana Paula C. Larocca
Ricardo Ernesto Schaal

Laboratório de Mensuração, Departamento de Transportes,
Escola de Engenharia de São Carlos, USP

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados da pesquisa de um método de coleta e análise de dados GPS em uma estrutura viária, procurando comprovar o potencial do GPS como instrumento de controle e monitoramento de deslocamentos dinâmicos em obras civis. Um instrumento de medições dinâmicas deve fornecer a amplitude e frequência do comportamento da estrutura. No GPS, a frequência pode ser obtida da variação temporal da fase dos sinais recebidos em dois receptores por meio de processo interferométrico, e a amplitude, por meio de uma calibração, que é possível usando um oscilador eletromecânico instalado junto à obra. Para tal comprovação, a passarela estaiada de madeira da Escola de Engenharia de São Carlos foi instrumentada com GPS e transdutor de deslocamento, durante ensaios de vibração forçada, sob ação de pedestres. Na análise final, verificou-se incrível concordância entre os resultados obtidos por esses dois equipamentos. A bibliografia nacional aponta este trabalho como pioneiro em aplicações práticas do GPS, como instrumento de monitoramento de deslocamentos dinâmicos de grandes estruturas.

Palavras-chave: GPS, pontes, análise do comportamento dinâmico.

Apresentação da Passarela Estaiada

A passarela estaiada de madeira (Figura 1) construída na Escola de Engenharia de São Carlos foi a primeira estrutura viária onde se aplicou o método de coleta de dados com o GPS (Schaal *et al.*, 2001, 2002a), testado no transcorrer de uma pesquisa de doutorado. A passarela, que se apresenta como a primeira passarela estaiada de madeira construída no Brasil, possui tabuleiro com 35 metros de comprimento, em madeira *Pinus taeda*, e a madeira usada para a torre e para as duas primeiras lâminas laterais dos módulos do tabuleiro foi o *Eucalipto citriodora*. A torre é constituída por um poste com 13 m de comprimento, 55 cm de diâmetro na base e 45 cm no topo. O tabuleiro tem a altura de sua seção transversal definida pela condição de limitação da aceleração máxima das vibrações ao limite proposto pelo *Eurocode 5*, parte 2. A passarela foi subdividida em sete módulos com dimensões nominais de 5 m de comprimento, 2 m de largura e 20 cm de altura; cada um deles constituído de

37 lâminas que medem 5 cm de largura por 20 cm de altura e 5 m de comprimento (Pletz, 2003).

Depois de concluída, foi exposta a uma série de ensaios estáticos e dinâmicos (Pletz, 2003). Para a realização dos ensaios estáticos, foi submetida a carregamentos constituídos por piscinas de material plástico cheias de água, dispostas ao longo de seu comprimento. Os autores tiveram a oportunidade de acompanhar os ensaios e realizar as leituras topométricas. Desta forma, foi possível a familiarização com o comportamento estrutural da passarela, o que foi fundamental para a escolha do módulo a ter os deslocamentos medidos no ensaio com o equipamento GPS.

Descrição da Metodologia de Coleta e Análise dos Dados GPS

O método empregado neste trabalho, batizado de Método de Resíduo da Fase (MRF), utiliza os dados GPS apoiando-se no princípio do interferômetro de

fase. Assim, a interferometria (do inglês *interferometry*: *interfere* + *measure* = *interfer-o-metry*) é o uso do fenômeno da interferência em sinais para efetuar, por exemplo, medidas de distância através da mudança de fase provocada em um dos sinais. Um feixe de luz incidente sobre um espelho divide-se em dois outros feixes perpendiculares entre si. Parte do feixe de luz é refletida e parte atravessa para outro meio. Esta porção bate em um espelho prateado e é refletida. Por outro lado, a outra porção bate num outro espelho, que pode ser movimentado, e também é refletida. Neste caso, os feixes caminham a mesma distância, e a fonte de luz reconstituída pode ser vista refletida na tela (Holmes, 1998). No caso de o espelho móvel ser deslocado de uma distância ΔS de sua posição original, o feixe de

luz azul percorrerá uma distância maior que o feixe vermelho, causando diferente padrão de interferência, que pode ser visto na tela (Figura 2).

Considerando-se o feixe de luz como a onda eletromagnética emitida pela antena de um satélite GPS e os espelhos com as antenas GPS, os movimentos senoidais, verticais ou horizontais sofridos pela antena móvel provocarão alteração na fase do sinal coletado pelo receptor ligado a esta antena. Isso altera as relações de fase entre o sinal GPS captado pelas duas antenas (estática e móvel). E essa mudança de fase causada pelos movimentos periódicos sofridos pela antena pode ter sua amplitude e frequência calculadas. A antena GPS móvel, por exemplo, pode estar presa em uma estrutura sob ação de carga dinâmica.



Figura 1 Passarela estaiada de madeira construída na Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC-USP).

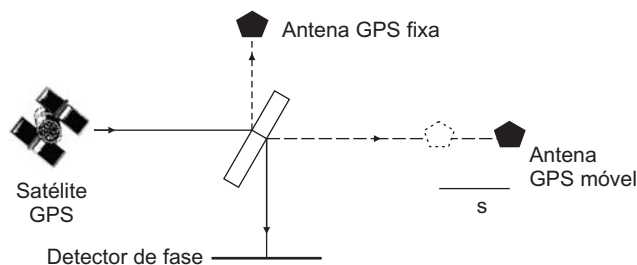


Figura 2 Relação do princípio do interferômetro de fase com os sinais e antenas GPS.

Matematicamente, a interferometria pode ser expressa por meio de uma dupla diferença envolvendo os dados de fase dos dois satélites coletados simultaneamente pelos dois receptores (Dupla Diferença de Fase – DDF).

Subtraindo o valor médio da DDF, determinado por meio de um ajustamento, obtêm-se resíduos que contêm todas as perturbações de fase que não são comuns aos respectivos dados coletados nos dois receptores. Estes resíduos basicamente são gerados pelo movimento da antena fixa na estrutura, diferenças causadas por pequenas flutuações da órbita dos satélites, diferenças no atraso ionosférico e troposférico, diferenças devido a perturbações locais na propagação da onda (multicaminhamento) e diferenças de ruído de fase da eletrônica de cada receptor.

Quando a distância entre dois pontos observados é menor que 1 km, os resíduos decorrentes das órbitas, ionosfera e troposfera, se tornam desprezíveis, restando a movimentação de uma das antenas, a contribuição local e dos receptores (Schaal *et al.*, 2002b). A contribuição local se apresenta como uma variação lentamente variável, assim, em função do longo período de passagem dos satélites na abóbada celeste e da contribuição decorrente, os receptores têm caráter estocástico, sem nenhum padrão de periodicidade. Resta, portanto, dentro dos resíduos, a contribuição dos movimentos da antena. Se estes movimentos apresentarem caráter de oscilação periódica podem ser separados dos outros mediante uma análise espectral.

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) foi a ferramenta escolhida para realizar a análise dos resíduos no domínio das frequências e, conseqüentemente, conseguir identificar dentro de espectro as frequências correspondentes aos deslocamentos periódicos. O espectro também apresenta frequências muito baixas em razão da contribuição local

(multicaminhamento) e do ruído estocástico dos receptores (Langley, 1997).

O procedimento para a obtenção do espectro de frequência por meio da FFT de uma amostra de N dados requer que a frequência de amostragem dos dados seja no mínimo o dobro da frequência mais elevada contida na amostra, definida pelo Teorema de *Nyquist* (Brigham, 1974), e que a quantidade N seja igual a 2^n . O espectro obtido pela FFT se aproxima do espectro real com n tendendo a infinito.

O método embasado no princípio do interferômetro de fase requer apenas uma coleta de dados de dois satélites espaçados com ângulo próximo a 90° . Assim, para medir um deslocamento vertical, por exemplo, é necessário que um satélite esteja com elevação próxima a 90° e outro, com elevação próxima à linha do horizonte (Figura 3). Neste caso, o satélite mais baixo é considerado o satélite de referência e o satélite mais alto, o ‘satélite de medida’.

Com essa configuração, haverá grande contribuição no resíduo em função das alterações de fase do sinal do satélite próximo ao zênite, em relação ao satélite próximo ao horizonte, o qual praticamente não “vê” o movimento da antena.

Analogamente, quando se deseja caracterizar deslocamentos horizontais, o satélite mais alto é considerado como referência, permitindo obter o vetor dos resíduos do satélite mais baixo, onde será encontrada a maior contribuição em decorrência das alterações de fase do sinal do satélite próximo ao horizonte. O método, ainda, permite apresentar valores calibrados das frequências e amplitudes de movimentos desconhecidos, uma vez que pode ser utilizado o oscilador eletromecânico para produzir oscilações conhecidas (Schaal *et al.*, 2001, 2002a).

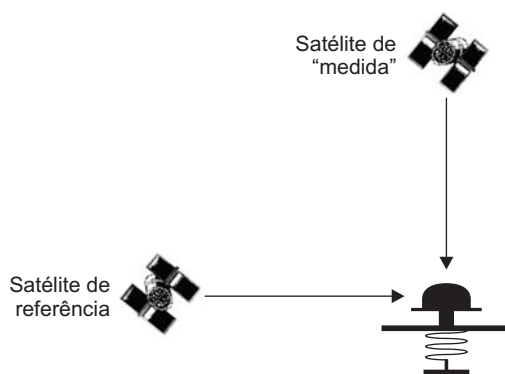


Figura 3 Configuração dos satélites em relação a uma antena GPS.

Este método requer apenas a presença de dois satélites em quadratura no espaço durante as medidas e se distingue dos métodos convencionais, pois não se baseia na determinação de coordenadas. De acordo com Meng *et al.* (2003), a precisão de coordenadas tridimensionais dos movimentos reais de uma estrutura depende da distribuição dos satélites na abóbada celeste.

Descrição da Instrumentação e dos Ensaios

Inicialmente foi realizado um ensaio com uma Estação Total para ter noção da ordem de grandeza dos valores esperados para a oscilação da passarela. Os valores mostraram deslocamentos acima do centímetro, encorajando o uso do GPS. Resultados dos ensaios estáticos anteriores utilizando medidores mecânicos de deslocamento mostraram que o tramo da passarela que apresenta maior flexibilidade vertical e horizontal é o tramo de número 2 (Figura 4), onde, então, foram realizados os ensaios de vibração forçada.

A instrumentação constituiu-se de um par de receptores GPS TOPCON-JAVAD, modelo LEGACY, com taxa de coleta de 20 Hz, equipado com antenas do tipo Choke-Ring, modelo JPS REGANT_SD_E, e de um transdutor de deslocamento KLOWA DT 100, com sistema de aquisição de dados VISHAY de 20 canais e taxa de 10 Hz, modelo 5100B Scanner. A Figura 4 ilustra a disposição dos instrumentos utilizados em relação à passarela, e as Figuras 5 e 6 ilustram estes instrumentos posicionados na passarela.

Um receptor GPS foi locado no meio da seção do tramo 2, tendo o centro da antena na mesma direção do transdutor de deslocamento. O outro receptor foi instalado no topo do talude fora da passarela. A antena desse receptor foi fixada no oscilador eletromecânico para ter um pico no espectro de frequência e amplitude conhecidas e, então, servir de calibrador para o pico em razão do deslocamento da passarela, conforme ilustra a Figura 7. O oscilador foi ajustado para aplicar movimentos de amplitude de 12 mm, com frequência de 1,1 Hz na antena.

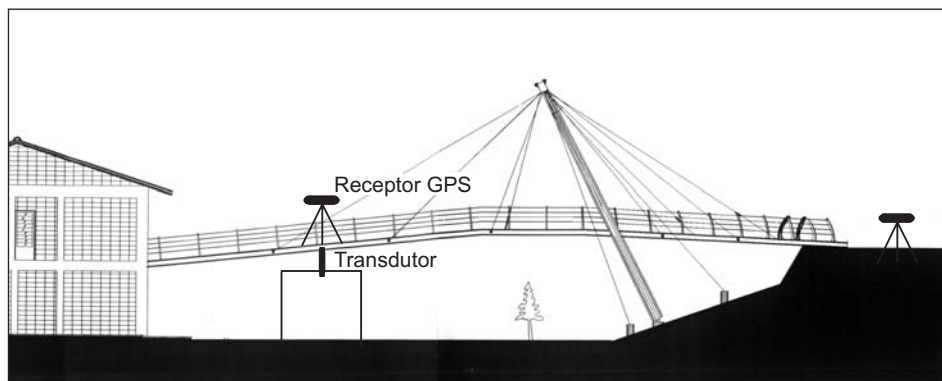


Figura 4 Disposição dos receptores GPS e do transdutor de deslocamento em relação à passarela. *Fonte:* Pletz (2003), modificado pelos autores.



Figura 5 Antena GPS móvel instalada sobre o tabuleiro da passarela e transdutor de deslocamento sob o tabuleiro.

Conforme mencionado anteriormente, a Figura 7 apresenta a antena, em conjunto com o dispositivo calibrador de amplitude, montada no tripé fixo no tabuleiro da passarela. Os ensaios de vibração forçada foram realizados com 15 pedestres caminhando de forma ordenada sobre o tabuleiro (Figuras 8 e 9). O ensaio teve duração aproximada de 10 minutos.

Resultados dos Ensaiois

Na Figura 10 ilustram-se os dados obtidos com o transdutor de deslocamento. Por meio dos valores máximos e mínimos registrados, determinou-se o valor da amplitude do deslocamento, resultando em 13 mm. Aplicando-se a FFT, pode-se ver claramente na Figura 11 o pico na frequência de 2,0 Hz correspondente aos movimentos periódicos registrados pelo transdutor de deslocamento.

Durante o experimento, os satélites de medida e de referência estavam próximos a 74° (PRN 28) e 05° PRN (26), respectivamente. A Figura 12 ilustra os resíduos da dupla diferença de fase entre esses satélites. A análise espectral desses resíduos (Figura 13) permite extrair o valor da frequência da máquina, 1,1 Hz, e o valor da frequência de resposta da passarela, 2,1 Hz, com relação à ação dos pedestres.

Na Figura 13, pode-se observar, também, que o pico correspondente ao deslocamento aplicado pelo oscilador na antena é perfeito, pois os movimentos são aplicados com determinada frequência constante. Já o pico correspondente ao deslocamento provocado pela ação de caminhar dos pedestres, embora ordenado, não é perfeito, porque cada pessoa possui um comprimento de passo e determinado peso.

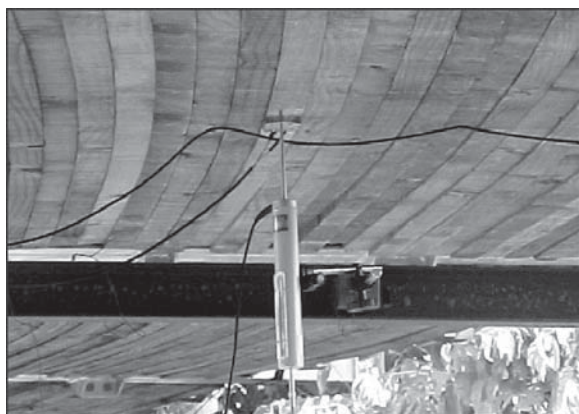


Figura 6 Transdutor de deslocamento fixo ao tabuleiro e o sistema de aquisição de dados do transdutor.



Figura 7 Vista da antena móvel sobre o oscilador eletromecânico.

Através da comparação direta da amplitude dos picos ilustrados na Figura 13, determinou-se o valor da amplitude do deslocamento da passarela, pois sabe-se que o valor correspondente à amplitude do deslocamento aplicado pelo dispositivo é 12 mm. Medindo-se na Figura 13, em escala natural, se obteve:

$$\left. \begin{array}{l} 8,3 \text{ cm} \longrightarrow 12 \text{ mm} \\ 9,0 \text{ cm} \longrightarrow x \end{array} \right\} x = 13 \text{ mm}$$

A Tabela 1 apresenta os valores obtidos com o GPS e com o transdutor, que também concordam com o valor teórico apresentado por Pretlove *et al.* (in CEB, 1991), que mencionam que a resposta de uma passarela à ação de pedestres apresenta frequência média de 2 Hz com desvio-padrão de 0,175 Hz. Dois outros experimentos foram realizados com o objetivo de tentar detectar frequências naturais e harmônicas da passarela, nos dias 19 e 20 de fevereiro de 2003. Durante esses dois outros ensaios, o satélite de referência, PRN 29, estava com 16° de elevação

e o satélite de medida, PRN 28, com 78° de elevação, já a passarela não foi instrumentada com transdutor de deslocamento.

A análise espectral mostrou a ocorrência de mais dois picos, além do pico decorrente das oscilações provocadas pelo oscilador (1,1 Hz) e do pico decorrente da ação de caminhar, com frequência de 2,0 Hz, ilustrados na Figura 14. Nessa mesma figura visualiza-se, além desses dois picos, o pico com valor de frequência igual a 3,1 Hz, correspondente ao valor da frequência natural vertical da passarela, de acordo com Pletz (2003), que apresenta para a mesma frequência o valor de 3,2 Hz. O quarto pico, cujo valor de frequência é igual a 4,1 Hz, corresponde à frequência do segundo modo de vibração, de acordo com o exposto por Pretlove *et al.* (in CEB, 1991). A Tabela 2 resume esses resultados.

O espectro da Figura 14 resultou da aplicação da Transformada Rápida de Fourier nos resíduos de dados GPS, coletados no dia 20 de fevereiro de 2003.



Figura 8 Vista frontal dos pedestres caminhando sobre a passarela e vista da antena GPS sobre o oscilador.



Figura 9 Vista lateral dos pedestres caminhando sobre a passarela.

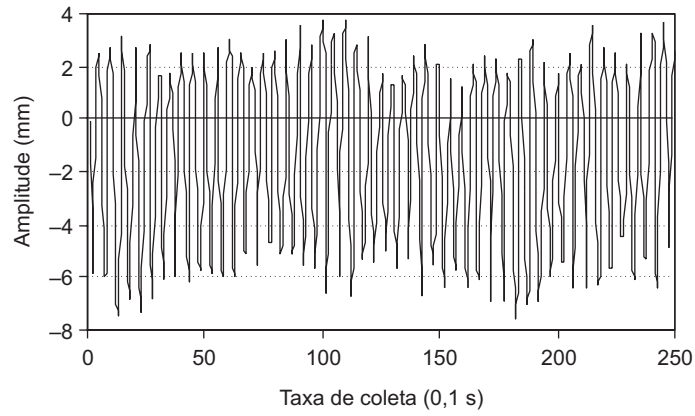


Figura 10 Dados obtidos com o transdutor de deslocamento.

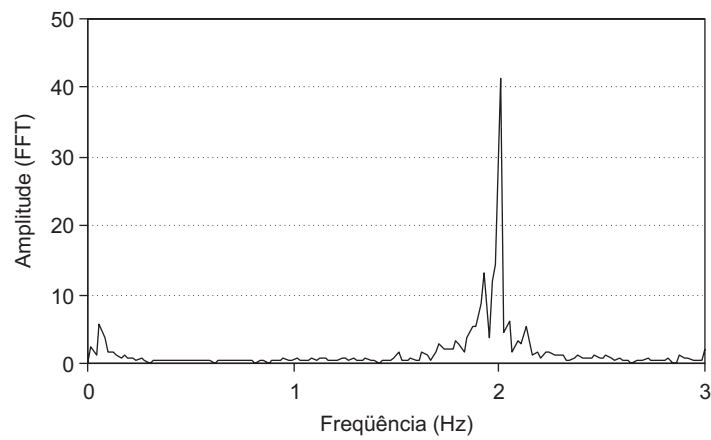


Figura 11 Espectro dos dados registrados pelo transdutor de deslocamento.

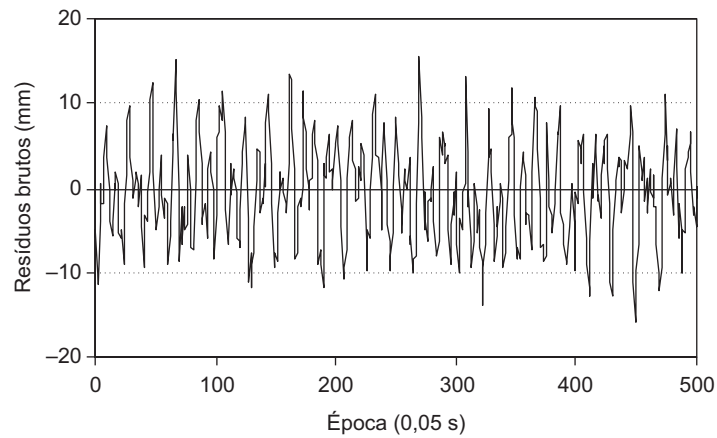


Figura 12 Resíduos brutos dos deslocamentos verticais da passarela e do dispositivo.

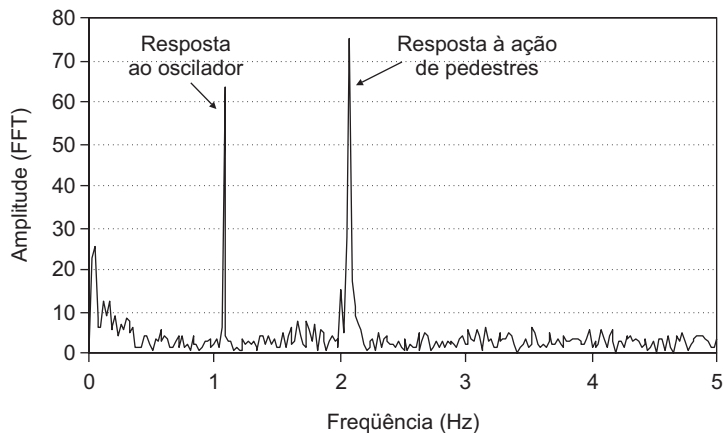


Figura 13 Espectro com o pico correspondente aos deslocamentos periódicos do oscilador e da passarela.

Tabela 1 Valores de freqüência e amplitude de deslocamento da passarela, sob a ação de pedestres, obtidos com o GPS e com o transdutor de deslocamento.

Equipamento	Freqüência de resposta ao caminhar de pedestres (Hz)	Amplitude do deslocamento vertical (mm)
GPS – 20 Hz e antena Choke-Ring	2,1	13,0
Transdutor de deslocamento – 100 mm	2,0	13,0

Tabela 2 Valores de freqüências teóricas e obtidos com o GPS para a passarela.

	Freqüência natural (Hz)	Freqüência do 2º modo de vibração (Hz)
GPS – 20 Hz e antena Choke-Ring	3,1	4,1
Teórico	3,2	4,1

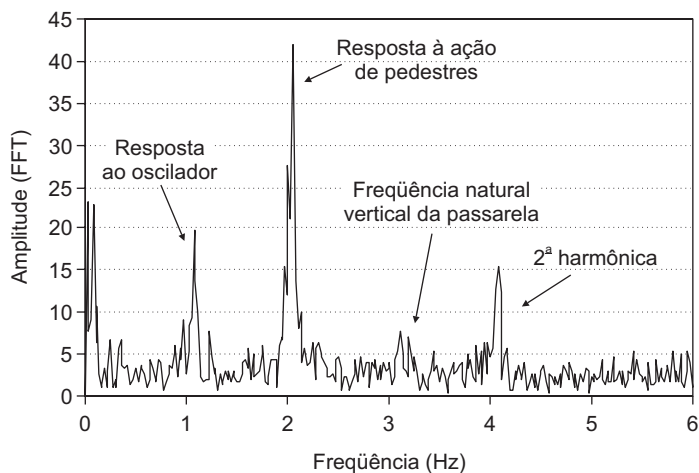


Figura 14 Espectro com o pico correspondente ao deslocamento periódico causado pelo oscilador, como resposta à ação dos pedestres e freqüência dos primeiro e segundo modos verticais de vibração.

Conclusões

A pesquisa da comparação dos resultados obtidos com o GPS, com o transdutor de deslocamento e com valor teórico, resultantes dos ensaios de vibração realizados na passarela estaiada de madeira, permite confirmar a fidelidade dos resultados obtidos pelo GPS na caracterização do comportamento dinâmico de estruturas. Conseqüentemente, os resultados comprovam a eficiência e a potencialidade do método de coleta e análise dos dados GPS na obtenção dos valores das frequências e da amplitude dos deslocamentos dinâmicos, mostrando que a limitação imposta pela necessidade de configuração geométrica especial, neste caso, não prejudicou em nenhum momento a programação e realização dos ensaios.

O oscilador eletromecânico como calibrador, conjuntamente com o método de coleta e análise de dados, MRF, é uma solução que permite definir a medida da amplitude do deslocamento da estrutura com uma precisão milimétrica que não é facilmente obtida por outros métodos. A exatidão da frequência da oscilação da estrutura é garantida pela estabilidade dos padrões atômicos da base de tempo do GPS. No caso do sensor de deslocamento, a exatidão da frequência depende do oscilador interno do sistema de aquisição de dados, e a sua precisão na medida de deslocamento depende de qualidades construtivas.

Diante do exposto, conclui-se que o GPS pode substituir o sensor convencional, nos locais que impeçam a sua instalação, para a medida com precisão milimétrica de deslocamentos dinâmicos e suas frequências, sugerindo a sua incorporação como instrumento de controle e monitoramento de estruturas.

Agradecimentos

Ao Departamento de Transportes da Escola Politécnica da USP, pelo empréstimo dos receptores GPS TOPCON-JAVAD; ao Laboratório de Madeiras, LaMEM, da Escola de Engenharia de São Carlos, em particular ao professor titular Carlito Calil Jr., pela permissão e auxílio na execução

da instrumentação da passarela de madeiras estaiada, ao técnicos do LaMEM e aos alunos da pós-graduação do Departamento de Transportes e do Laboratório de Madeiras da Escola de Engenharia de São Carlos, por “servirem” como carga móvel durante os ensaios realizados.

Referências Bibliográficas

BRIGHAM, E. O. *The Fast Fourier Transform*. 1. ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1974. Cap. 1, p. 1-8.

HOLMES, J. B. 1998. *Michelson interferometer*. Disponível em: <http://www.cbu.edu/~jholmes/P252/Light21n/sld040.htm>. Acesso em: 20 de set. de 2003.

LANGLEY, R. B. GPS Receiver System Noise. *GPS WORLD* – Innovation. June 1997.

PLETZ, E. *Passarela estaiada com tabuleiro de madeira laminada protendida em módulos curvos*. 2003. 164 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PRETLOVE A, J.; RAINER, H. *Vibrations induced by people*. Bulletin d' Information n. 209. In: CEB, 1991. Lausanne, 1991. Cap. 1, p. 1-10.

SCHAAL, R. E.; LAROCCA, A. P. C. *A methodology to use the GPS for monitoring vertical dynamic subcentimeter displacement*. Canadá: New Brunswick, Digital Earth 2001 – Fredericton, jun. 2001.

SCHAAL, R. E.; LAROCCA, A. P. C. *Degradation in the detection of millimetric dynamic movements due to metallic objects close to the GPS antenna*. COBRAC – Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis, SC, out. 2002b.

SCHAAL, R. E.; LAROCCA, A. P. C. *A methodology for monitoring vertical dynamic sub-centimeter displacements with GPS*. *GPS Solutions*, v. 5, n. 3, p. 15-18, 2002a, Winter.