

# A TECNOLOGIA GPS APLICADA À DETECÇÃO DE DESLOCAMENTOS VERTICAIS CAUSADOS POR FORÇAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS

*Gps Technology Applied to Detection of Vertical Displacements Caused by Static and Dynamic Forces*

**Ricardo Ernesto Schaal**  
**Ana Paula Camargo Larocca**

**Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**

**Departamento de Transportes**

Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP:13560-900, São Carlos/SP, Brasil

schaal@sc.usp.br

apclarocca@superig.com.br

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise teórica e experimental do uso do GPS como equipamento de medida de deslocamento vertical, tanto permanente como de caráter dinâmico. Equipamentos de medição sempre devem apresentar uma medida confiável com uma esperada precisão. Durante os últimos anos muitos esforços foram realizados para estabelecer métodos de observação, configuração do equipamento e programa de processamento para utilizar o GPS como um equipamento de medida de deslocamentos. As medidas obtidas de deslocamentos horizontais já apresentam precisão de milímetros. Por outro lado, nos deslocamentos resultantes de forças verticais estáticas ou dinâmicas, a precisão ainda permanece na faixa do sub-centímetro. Analisando o modelo da dupla diferença de fase verifica-se que a presença de multicaminhamento das ondas é a principal fonte de degradação das medidas, a maioria em linhas de base curtas. Resultados experimentais confirmam a análise, mostrando que degradação está diretamente relacionada com a presença de materiais refletivos bem próximos às antenas. Uma investigação mais detalhada através de experimentos em duas situações distintas permitiu a detecção de deslocamentos verticais com precisão milimétrica. Um dos experimentos teve como cenário a atuação de forças estáticas causadas pela água em uma barragem de terra provida de pontos na crista para a fixação de antenas. Experimentos de carga dinâmica foram simulados com a antena de GPS fixada em um oscilador eletromecânico.

**Palavras chaves:** GPS, Mensuração, Controle de deslocamentos, Deslocamentos dinâmicos.

## ABSTRACT

This work presents a theoretical and experimental study on all benefits and inconveniences of the GPS as a vertical static and dynamic displacement measurement instrument. Measuring instrument must always give a reliable result with an expected "precision". During past years many efforts have been done to establish observing methods, hardware configuration and processing software to implement GPS as a displacement measuring tool. Reliable horizontal displacement e precision came down to millimeter range. On the other hand the precision of vertical displacement measurement, static or dynamic, remains at the sub-centimeter range. Running through phase double difference model it is shown that multipath is the main cause to degrade measurements, mostly on very short baselines. Results from experiments confirm the analysis showing that degradations directed related with reflector materials close to the antennas. A detailed investigation provided to us to detect vertical displacements with millimetric precision. One of experiments had as scenario the static forces caused by the water on embankment dam with points on the top to firm the GPS antennas. Dynamic experiments were simulated with the GPS antenna attached to an electro-mechanical oscillator.

**Key words:** GPS, Measurement, Displacement control, Dynamic displacement.

## 1. INTRODUÇÃO

Em 1979, os pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) demonstraram pela primeira vez que seria possível obter a distância entre dois pontos próximos com acurácia de milímetros [Hofmann-Wellenhof et al., 1997]. Neste caso, sempre se pensa na distância horizontal ou quase horizontal. Controle de variações de distâncias horizontais, com precisão subcentimétrica tem sido amplamente divulgado na literatura. [Duffy et al., 2001; Aguirre e Gemael, 2001].

O problema passa a ser bem mais complexo quando se deseja obter deslocamentos verticais com precisão milimétrica, tanto é que após vários anos de aplicação do GPS, verifica-se que não está totalmente consagrado como um equipamento para a medição de deslocamentos verticais milimétricos. Na literatura atual, encontram-se mais trabalhos GPS para a obtenção da amplitude e da frequência de oscilações em grandes obras civis do que trabalhos para a obtenção de recalques [Chen et al., 1990; Breumso, 2001]. Quando se utiliza o nível ótico na medição do deslocamento vertical é fundamental a existência de um ponto de referência (*benchmark*) e este deve estar situado na proximidade dos pontos sob controle e de preferência com visibilidade direta. No caso de controles de longo prazo é muito comum que a cada visita as visadas fiquem obscuras. Simultaneamente, as condições climáticas em algumas regiões do Brasil são bastante instáveis e a elaboração de cronograma de visita às obras pode ficar prejudicado. Devido aos fatos mencionados, o GPS foi sinalizado como uma solução alternativa, pois o ponto de referência pode ficar mais afastado, em um local que permita maior garantia de estabilidade, bastando em cada visita efetuar uma limpeza em torno dos pontos. Adicionalmente, as condições climáticas têm pouca influência nas medições com o GPS. O GPS, mesmo apresentando uma precisão inferior às dos níveis óticos mecânicos, já poderia estar consagrado como equipamento de medição de recalque se apresentasse quase sempre a mesma precisão e exatidão. Por outro lado, na caracterização de deslocamentos ondulatórios, também denominados de deslocamentos dinâmicos, nos quais se deseja saber a amplitude e a frequência, o GPS tem se mostrado como uma alternativa promissora em relação a acelerômetros, sistemas inerciais, etc [Brown, 1999; Nakamura, S., 2000; Roberts et al., 2001; Schaal e Larocca, 2001; Roberts et al., 2004; Larocca, 2004a; Larocca, 2004b; Larocca e Schaal, 2005]

A literatura tem relatado que o GPS, no modo cinemático, permite detectar oscilações com amplitude superiores ao centímetro e frequências na faixa do sub-Hertz ao Hertz (Roberts et al, 2001; Meng et al., 2003). Nas frequências muito baixas, com períodos de dezenas de segundos ou amplitude milimétrica, as aplicações do GPS ainda se encontram em fase de pesquisa.

Procurando-se efetuar uma pesquisa nas possíveis fontes de erros das observações de fase no modo relativo que possam contribuir para aumentar o desvio padrão de medidas milimétricas, se decidiu por uma análise do modelo teórico, uma simulação de interferência nos dados de fase e experimentos para detectar deslocamentos verticais controlados.

## 2. ANÁLISE DO MODELO TEÓRICO

Na pesquisa foi empregada, pela qualidade que pode proporcionar aos resultados dela derivados, a dupla diferença de fase, obtida pelas observações da fase da portadora dos satélites GPS em duas estações distintas. A expressão (1) apresenta a dupla diferença de fase proposta por Leick [1995]. Os índices *p* e *q* indicam dois satélites e os índices *k* e *m* as antenas dos dois receptores de GPS.

$$\begin{aligned} \varphi_{km}^{pq}(t) = & \frac{a^p}{c} [\rho_k^p(t) - \rho_m^p(t)] - \frac{a^q}{c} [\rho_k^q(t) - \rho_m^q(t)] \\ & + \frac{f}{c} [\rho_k^p(t) - \rho_m^p(t)] - \frac{f}{c} [\rho_k^q(t) - \rho_m^q(t)] \\ & + \frac{f}{c} [\dot{\rho}_k^p(t) dt_k - \dot{\rho}_m^p(t) dt_m] - \frac{f}{c} [\dot{\rho}_k^q(t) dt_k - \dot{\rho}_m^q(t) dt_m] \\ & + N_{km}^{pq}(1) + I_{km,\varphi}^{pq}(t) + \frac{f}{c} T_{km}^{pq}(t) + \varepsilon_{km,\varphi}^{pq} + d_{km,\varphi}^{pq}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

onde:

- $\varphi_{km}^{pq}(t)$ : Dupla diferença de fase – ciclos;
- f*: Frequência do sinal – Hz;
- c*: Velocidade da luz – m/s;
- $\rho$ : Distância topocêntrica do satélite ao receptor – m;
- $\dot{\rho}$ : Velocidade topocêntrica – m/s;
- $dt_k$ : Desvio do relógio do receptor *k* ou *m* – s;
- $dt^p$ : Desvio do relógio do satélite *p* ou *q* – s;
- $N_{km}^{pq}(1)$ : Ambigüidade inicial da dupla diferença (valor em ciclos inteiros);
- $a^p$ : Parâmetro de correção da frequência do satélite *p* ou *q* – Hz;
- $I_{km,\varphi}^{pq}(t)$ : Atraso da fase devido à refração na Ionosfera – ciclos;
- $T_{km}^{pq}(t)$ : Variação da distância devido à refração na Troposfera – m;
- $d_{k,\varphi}(t)$ : Retardo da fase devido ao equipamento receptor *k* ou *m* – ciclos;
- $d_{\varphi}^p(t)$ : Retardo da fase devido equipamento do satélite *p* ou *q* – ciclos;
- $\varepsilon_{km,\varphi}^{pq}$ : Erro aleatório na medida de fase – ciclos;
- $d_{km,\varphi}^{pq}(t)$ : Desvio da fase recebida devido à presença de multicaminhamento – em ciclos.

Neste trabalho não é apresentado como são obtidas as coordenadas a partir da dupla diferença de fase, pois está amplamente descrito na literatura [Leick, 1995] e

sim a contribuição de cada termo na composição final da precisão das coordenadas:

**I.** Nas bases bem curtas, próximas ao quilômetro, desvios sistemáticos devido à refração das ondas na Ionosfera podem ser desprezados. Os desvios sistemáticos devido à Troposfera também podem ser desprezados desde que não haja uma acentuada diferença de altitude entre os dois receptores. Neste caso, as contribuições de erro sistemático dos termos  $I_{km,\varphi}^{pq}(t)$  e  $T_{km,\varphi}^{pq}(t)$  podem ser desprezadas no cálculo das coordenadas. [Schaal, 1998]. Como a Ionosfera e a Troposfera apresentam o efeito de cintilação de fase haverá um aumento no termo  $\varepsilon_{km,\varphi}^{pq}$  pelo fato de que os detectores de fase de cada canal, nos respectivos receptores, não percebem da mesma forma estas rápidas variações de fase;

**II.** Os dois primeiros termos da expressão (1) envolvem as duplas diferenças com relação às distâncias topocêntricas entre os satélites e receptores multiplicadas pelo desvio de frequência dos respectivos satélites. Os satélites estão providos de padrões atômicos cujos desvios relativos permanecem na ordem de 1 parte em  $10^{11}$ . Assumindo-se este desvio, na portadora L1 e uma base de 1 km, se obtém um erro sistemático de  $10^{-6}$  ciclos, o que é totalmente desprezível. Por outro lado, todo padrão também apresenta um ruído aleatório de fase que será refletido na portadora. Este ruído é registrado pelo receptor e não há meio de suprimi-lo na dupla diferença. Este ruído está embutido no termo  $\varepsilon_{km,\varphi}^{pq}$ ;

**III.** Os dois próximos termos representam a dupla diferença das distâncias que será usada na determinação da linha de base propriamente dita. A única fonte de erro sistemático nestes dois termos é a variação relativa do centro de fase das duas antenas. Para minimizar a contribuição deste erro, as duas antenas devem ser de mesmo modelo e instaladas na mesma direção;

**IV.** O quinto e sexto termos envolvem as velocidades topocêntricas entre os satélites e os receptores, multiplicadas pelos erros dos respectivos relógios. Considerando-se a proximidade entre os receptores, pode-se afirmar que estas velocidades para um mesmo satélite são praticamente iguais. Dessa forma, estes termos ficam mais na dependência da diferença do erro dos relógios dos receptores em relação ao relógio do satélite. Segundo Leick [1995], se esta diferença chegar a um microsegundo e a velocidade topocêntrica a 800 m/s, a contribuição destes termos é de 0,004 ciclos. Portanto se o sistema eletrônico de sincronização do relógio apresentar um ruído com desvio padrão de  $\pm 1$  microsegundo, haverá uma contribuição de 0,004 ciclos de ruído de fase em cada receptor. Este valor pode ser desprezado em relação à contribuição dos outros termos;

**V.** A dupla diferença das ambigüidades iniciais  $N_{km}^{pq}(1)$  no controle de deslocamentos, onde se usa bases curtas quase horizontais deve ser um inteiro pelo fato dos sinais dos satélites atravessarem a mesma atmosfera. Neste caso é somente aceitável a solução “fix” após processamento dos dados. A solução “float” introduz um erro sistemático inaceitável;

**VI.** O termo  $\varepsilon_{km,\varphi}^{pq}$  refere-se ao erro aleatório da medida da fase. A cada época se tem a contribuição da cintilação da ionosfera e da troposfera e a contribuição da eletrônica dos receptores. Nestes, a maior contribuição ocorre no detector de fase da portadora. A precisão dos detectores de fase é da ordem de 0,01 ciclos o que representa uma precisão dois milímetros na distância medida. Aplicando-se a teoria de propagação de erro, na dupla diferença a precisão passa para 4 milímetros. Em um receptor de boa qualidade, o detector de fase deve ter erros com distribuição unicamente aleatória, portanto, a sua contribuição na precisão dos resultados deve diminuir com a raiz quadrada do tempo de observação;

**VII.** O termo  $d_{km,\varphi}^{pq}(t)$  refere-se a um erro sistemático variável no tempo, definido por multicaminhamento. A presença de obstáculos que reflitam microondas, especialmente superfícies de materiais que contenham água e metais nas vizinhanças, distorce a frente da onda junto à antena. Com o deslocamento dos satélites em suas órbitas, esta distorção provoca um avanço ou retardo da fase variável no tempo de uma forma singular para cada satélite; para cada local de instalação da antena e para cada distribuição espacial dos obstáculos nas vizinhanças. Esta variação de fase não tem como ser modelada ou mesmo prevista. Teoricamente, o máximo desvio é da ordem de um quarto do comprimento de onda para cada satélite (Brasch, 1996). No caso extremo, na dupla diferença pode haver contribuição até um comprimento de onda. A literatura apresenta inúmeros esforços para minimizá-lo, com o desenvolvimento de novas antenas, técnicas de coleta de dados e algoritmos matemáticos para o processamento dos dados. No entanto, ainda, não há como eliminar o erro sistemático introduzido pelo multicaminhamento [Tranquilla et al., 1994].

Conclui-se teoricamente que, em bases curtas, a única fonte de degradação sistemática das medidas com o GPS é o multicaminhamento. Schaal [2000] chegou a uma expressão empírica que relaciona a precisão da medida vertical com a intensidade do multicaminhamento.

### 3. EXPERIMENTOS

Os métodos usados nos dois experimentos são bastante distintos. No primeiro, foi aproveitada a oportunidade de se acompanhar o enchimento do reservatório da

Usina Hidroelétrica de Canoas no rio Paranapanema, próxima à cidade de Assis, SP, no ano de 1999. A barragem tem comprimento total de 774 metros, constituída de uma parte em concreto e uma parte em terra, com aproximadamente 440 metros. Dos estudos relacionados com geotecnia, se sabe que o topo de uma barragem de terra sempre sofre um recalque sensível após o enchimento. Por se tratar de um processo muito lento, se pode afirmar que se trata de um processo de medição estático, podendo-se efetuar medições espaçadas de meses. O segundo experimento foi realizado na cobertura de alumínio da caixa de água do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, USP, em 2003. Em uma das antenas GPS se aplicou um movimento periódico controlado por um oscilador eletro-mecânico. Neste caso o processo de medição teve que levar em conta este aspecto dinâmico.

### 3.1 DESLOCAMENTO PERMANENTE

O teste de campo foi sugerido pelo grupo de topografia da CESP (Companhia Energética de São Paulo), na época responsável pelo controle das barragens de terra das hidroelétricas no Estado de São Paulo. Além dos clássicos equipamentos instalados diretamente na barragem (piezômetros, inclinômetros, etc.), existe um programa de visitas periódicas com equipamentos de topografia. Dentro desta política foi questionado pela CESP se o GPS poderia facilitar estes trabalhos devido a sua facilidade de operação em campo.

Duas obras em andamento foram examinadas. A primeira, em Porto Primavera com uma barragem de terra de 11 km de extensão. Em certo trecho da barragem ocorre um subsolo com características de aluvião que poderia implicar em deslocamentos devido à pressão da água do reservatório. Após uma análise detalhada, os engenheiros responsáveis decidiram proceder a uma revisão em todo o sistema de drenagem e as medidas topográficas foram adiadas. Na mesma época a Usina Canoas I estava em fase final de construção e o seu enchimento, planejado para um futuro de poucos meses, permitiria realizar um experimento bem controlado.

#### 3.1.1 Trabalhos de campo

Em uma primeira visita na obra foram escolhidos dois locais para a construção de pilares para instalação das antenas de referência. Neste tipo de experimento é fundamental o uso simultâneo de dois receptores de referência para se contar com reserva de dados. Na barragem de terra foram escolhidos três pontos de teste na sua crista, locais que se previa maior recalque. Para monumentar os pontos de referência, um de cada lado do rio, foram construídos pilares de concreto, com 1,6 metros acima do solo, providos de uma rosca no topo para a fixação da antena. Na barragem de terra foram cravados três blocos de concreto, também munidos de

rosca para a fixação da antena, Figura 1. A rosca para a fixação das antenas se fez necessária devida presença de ventos intensos no vale do rio. Infelizmente, o topo destes blocos teve que ser construído rente ao solo para não serem danificados com a passagem de veículos. O uso de tripé foi descartado devido os ventos intensos. Para o nivelamento geométrico foram instalados blocos próximos com placas para apoio das miras a serem usadas pelo nivelamento. Posteriormente a esta visita de definição dos locais foram realizadas as duas visitas para efetuar as medições. A primeira com o reservatório vazio, em 5 de Janeiro de 1999 e a segunda, sete meses após o enchimento total. De acordo com os engenheiros da obra, este período seria o suficiente para provocar um recalque sensível na barragem de terra. A coleta de dados GPS foi realizada com três receptores *Trimble L1/L2*, modelo SST 400. Para o levantamento clássico foi utilizado nível *Wild N3*, precisão nominal 0,2 mm em nivelamento duplo de 1 km.



Fig. 1- Antena fixada na crista da barragem de terra

Pela necessidade de redundância, em cada sessão, decidiu-se usar dois receptores nos pontos de referência e um receptor no topo da barragem. Condição ideal seria a observação simultânea dos três pontos na barragem, totalizando cinco receptores.

Em cada visita foram realizadas duas sessões de uma hora de observação, uma no período matutino e a outra no período vespertino. A Fig. 2 apresenta os vetores obtidos durante as observações. Observa-se que a geometria foi escolhida de forma que os vetores dos pontos de referências aos pontos na barragem formassem aproximadamente um ângulo reto.

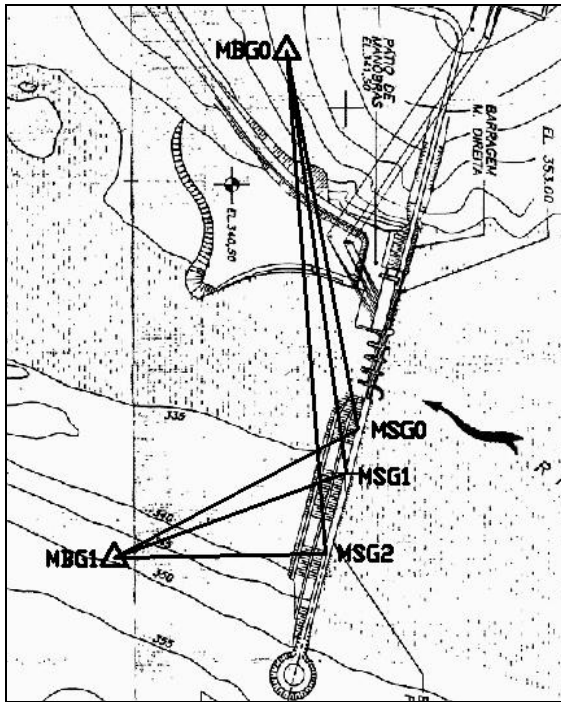


Fig. 2 - Vetores ligando os pontos de referência aos pontos na barragem

Fonte: CESP, 1994, modificado por Schaal

### 3.1.2 Processamento dos dados

Inicialmente os dados coletados foram processados e ajustados, com programas de natureza científica, os dados L1/L2 dos dois pontos de referência (MBG0 e MBG1) e os dados da Estação Presidente Prudente da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) localizada a 175 km da cidade de Assis. O rastreamento foi feito no dia 5 de janeiro. Importante mencionar que o conhecimento do valor exato das coordenadas destes pontos não é primordial neste projeto, e sim que não ocorresse deslocamento dos pilares entre as duas visitas. Para a determinação do deslocamento dos pontos na barragem foram processados e ajustados apenas os dados L1, separadamente, a partir de cada ponto de referência.

### 3.1.3 Resultados

Em datas muito próximas às medições com GPS foram realizados os nivelamentos geométricos. Para estes nivelamentos foram usados dois pontos como referência, um ponto na construção de concreto que abriga os geradores e um segundo no extremo oposto da barragem de terra, em solo firme. Considerando que os movimentos da barragem são muito lentos, um intervalo de poucos dias entre as observações com o GPS e as convencionais não motiva uma diferença sensível para efeitos de comparação. A Tabela 1 apresenta as coordenadas dos pontos de referência, a partir da RBMC e o desvio padrão do ajustamento com os dados das duas sessões.

TABELA 1 – Coordenadas dos pontos MBG0 e MBG1

MBG0		Desvio padrão (m)
Latitude	22° 56' 14,60192"	± 0.01232
Longitude	50° 31' 04.90076"	± 0.04644
h (m)	364.594	± 0.07739
MBG1		Desvio padrão (m)
Latitude	22° 56' 37.26096"	± 0.01455
Longitude	50° 31' 13.32696"	± 0.01623
h (m)	343.268	± 0.12552

A Tabela 2 apresenta os recalques medidos com GPS obtidos pela diferença da primeira medida, em janeiro de 1999 e da segunda medida efetuada sete meses depois, em relação aos marcos de referência MBG0 e MBG1 os respectivos desvios padrão e os recalques medidos com o Nível N3, estes com desvios estimados em 0,2 mm.

TABELA 2 - Recalques medidos com o GPS e nível

Ponto	MBG0 mm	$\sigma$ mm	MBG1 mm	$\sigma$ mm	Nível (mm)
MSG0	-9,5	4,4	-14,4	4,3	-10,7
MSG1	-13,0	2,9	-10,4	2,1	-10,6
MSG2	-10,2	2,8	-10,5	2,3	-10,1

O desvio padrão das medidas foi calculado a partir dos desvios obtidos no ajustamento das duas sessões em cada visita.

Teoricamente, seria de se esperar maior perturbação nas medidas no ponto MSG0 por estar mais próximo da barragem de concreto, pois na época das duas visitas estava ocupada por guindastes e outras estruturas metálicas, conforme ilustra a Fig. 3. O primeiro indicador desta maior perturbação é o desvio padrão dos valores dos recalques em MSG0, mais elevado em relação aos outros dois pontos e a segunda indicação é a diferença de aproximadamente 5 mm entre os recalques obtidos em relação às duas referências. No ponto MSG1 esta diferença já é menos acentuada, ficando em 2,6 mm e no ponto MSG2, o mais afastado, a diferença é inferior a 1 mm. Os valores obtidos estão compatíveis com os valores obtidos com o Nível N3.



Fig. 3 – Guindastes e estruturas metálicas próximas ao ponto MSG0

Os deslocamentos horizontais entre as duas visitas não foram superiores a 3 mm, com desvio padrão de  $\pm 1,5$  mm. Sob o aspecto geotécnico, estes deslocamentos horizontais são considerados irrelevantes.

### 3.2 DESLOCAMENTOS DINÂMICOS

Dentro do programa de pesquisas do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) existe uma linha de pesquisa relativa à aplicação do GPS para a medição de deslocamentos dinâmicos de obras de grande porte.

Para efetuar a medição de deslocamentos dinâmicos milimétricos foi desenvolvido um oscilador eletro-mecânico que aplica movimentos controlados na antena de GPS, tanto em relação à amplitude do deslocamento como a velocidade do mesmo. A Fig. 4 apresenta uma antena montada sobre o oscilador.



Fig. 4 – Oscilador eletro-mecânico para antena de GPS

Os experimentos consistiram em se utilizar um par de antenas, uma ao lado da outra, permanecendo uma estática, como referência e a segunda submetida aos movimentos periódicos. Os dados de GPS foram coletados com intervalo de amostragem pelo menos duas vezes superior à frequência de oscilação, de acordo com o teorema de Nyquist [Brigham, 1974].

Os dados coletados foram processados no método estático, sendo que o movimento é detectado nos resíduos do processamento da dupla diferença de fase, Schaal e Larocca [2001]. Quatro experimentos foram realizados com dois tipos de antenas em dois ambientes de características refletivas distintas. Um ambiente na cobertura de alumínio da caixa de água do Departamento de Transporte, considerado altamente refletivo e o segundo, no topo de um talude gramado, considerado de baixa refletividade.

#### 3.2.1 – Experimento com Antena Simples

Neste experimento foi utilizado um par de receptores *Leica SR530*, com antenas *AT502*. A Fig. 5 ilustra as duas antenas na cobertura de alumínio.

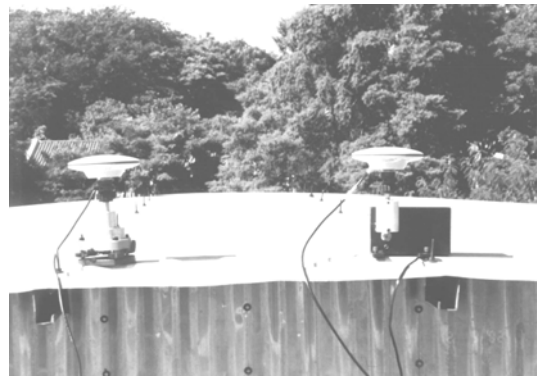


Fig. 5 - Antenas Leica AT502 na cobertura da caixa de água do Departamento de Transporte

Os dados foram coletados e processados para atender ao Método dos Resíduos de Fase (PRM) [Schaal e Larocca, 2002]. O processamento dos dados foi realizado com o programa OMNI do NGS (*National Geodetic Survey*), que permite escolher o satélite de referência, gera arquivo texto dos resíduos e permite processar até cinco épocas por segundo. O resíduo do processamento da dupla diferença representa a amplitude da soma de todas as interferências de fase em cada época. Esta soma engloba o movimento da antena, ruído de fase dos receptores e a contribuição de multicaminhamento. Considerando que cada um destes componentes apresenta um comportamento temporal distinto, é possível efetuar a detecção do movimento por meio da análise espectral.

A Fig. 6 apresenta o espectro de um dos experimentos simulando forças dinâmicas na antena GPS móvel na qual se aplicou um movimento de frequência em torno de 0,3 Hz e amplitude pico a pico de 3,0 mm. Verifica-se que o multicaminhamento degradou completamente as oscilações periódicas, não se verificando a ocorrência de picos no espectro.

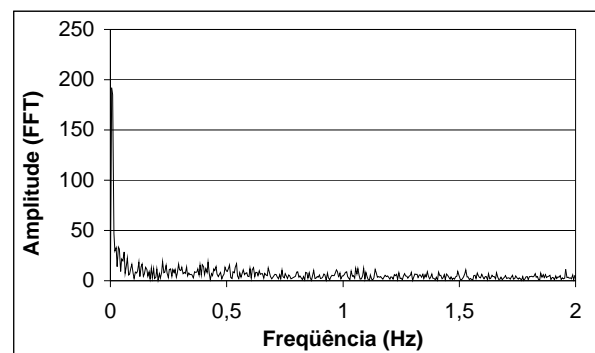
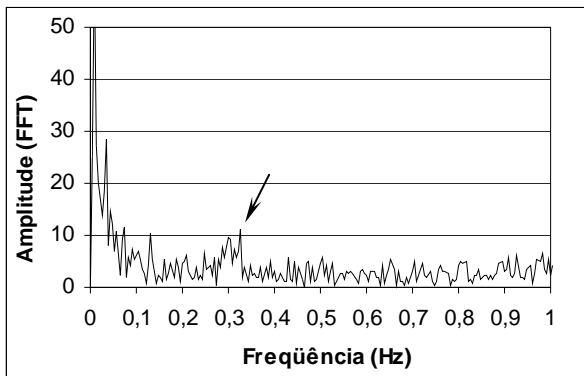


Fig. 6 – Espectro dos resíduos sem pico devidos aos movimentos oscilatórios aplicados na antena (ambiente altamente refletivo)

A Fig. 7, por sua vez, apresenta o espectro do segundo ambiente, na qual se identifica o pico (indicado pela seta) gerado pelo movimento aplicado na antena de frequência em torno de 0,3 Hz e amplitude pico a pico de 3,0 mm. A precisão da detecção, isto é, o desvio

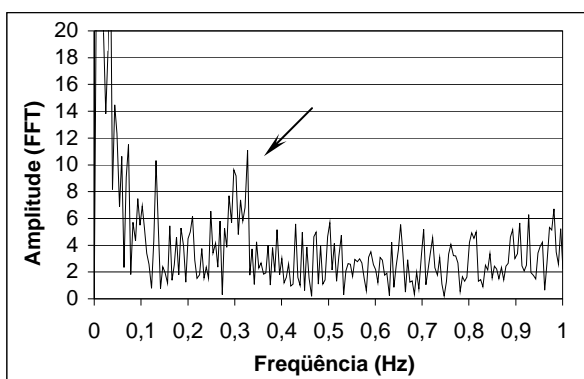
padrão da amplitude do pico, irá depender do ruído de fase na faixa de frequência em torno do pico. Foram realizados experimentos anteriores a este, aplicando na antena deslocamentos verticais periódicos de 12 mm e de 4,5 mm, uma vez que o objetivo era determinar o valor do menor deslocamento detectável com GPS e podem ser vistos em Larocca [2004a].



**Fig. 7** - Espectro dos resíduos que apresenta um pico gerado pelo movimento oscilatório da antena, de amplitude pico a pico de 3 mm (ambiente pouco refletivo)

Numa análise mais detalhada do espectro, apresentada na Fig.8, observa-se o pico (indicado pela seta) na frequência de 0,33 Hz estabelecida pelo oscilador mecânico.

No entanto, a amplitude do pico se apresenta e/ou quase se confunde com a amplitude do ruído ao seu redor, e assim, o valor do desvio padrão,  $\pm 1,4$  mm, quase metade do próprio valor medido, não apresenta sentido para medições na área de engenharia civil.



**Fig. 8** – Detalhe do espectro apresentado na Fig. 7

### 3.2.2 – Experimento com Antena *Choke-Ring*

Nestes experimentos foi utilizado um par de receptores *Topcon-Javad Positioning Systems (JPS) Legacy*, com antenas *JPS Regant\_SD\_E* do tipo *choke-ring*. As antenas foram montadas na mesma posição do primeiro experimento, apresentado na Fig. 9 conforme a Fig. 5.

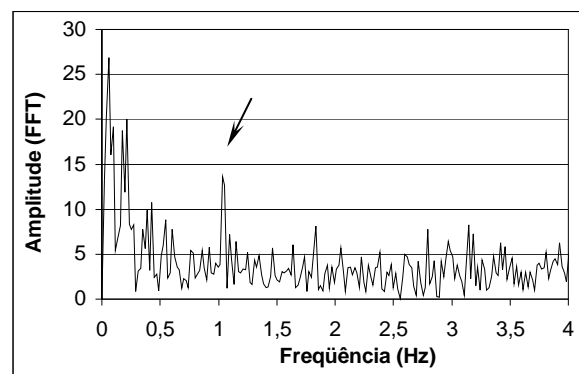


**Fig. 9** - Antenas *JPS Regant\_SD\_E choke-ring* na cobertura da caixa de água do Departamento de Transportes

#### 3.2.2.1 Processamento dos dados

Os dados foram processados com o programa *JPS Pinnacle 1.0*.

A Fig. 10 apresenta o espectro do experimento na caixa d'água, na qual se identifica de forma clara o pico gerado pelo movimento em torno de 1 Hz e amplitude de 2,5 mm.

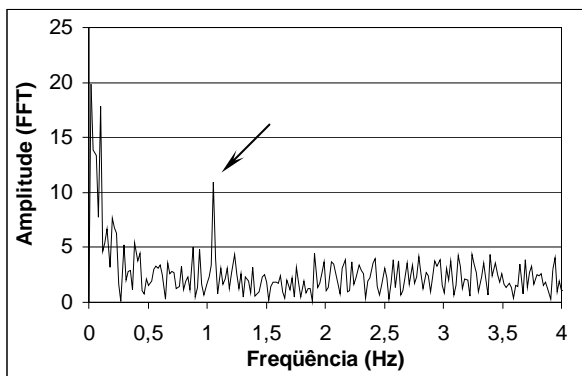


**Fig.10** - Espectro dos resíduos que apresenta pico gerado pelo movimento oscilatório da antena, de amplitude de 2,5 mm (ambiente altamente refletivo)

A precisão da detecção, isto é, o desvio padrão da amplitude do pico, irá depender do ruído de fase na faixa de frequência em torno do pico. Neste caso, o valor é de 0,8 mm, lembrando que o experimento foi realizado num ambiente considerado altamente ruidoso. Caso o pico, devido à oscilação, ocorra próximo às frequências abaixo de 0,2 Hz, neste caso, onde sempre existem outros picos gerados pelo multicaminhamento, a detecção se torna mais árdua e a precisão é bem inferior.

A Fig. 11 ilustra o espectro do experimento nas mesmas características do anterior, realizado no segundo ambiente (topo do talude). Comparando-se este espectro com o da Fig. 10, pode-se observar que amplitude média do ruído ao redor do pico é menor. Este fato, então, permite obter desvio padrão menor para a medição, apresentando o valor de  $\pm 0,5$  mm.





**Fig. 11** - Espectro dos resíduos que apresenta um pico gerado pelo movimento oscilatório da antena, de amplitude pico a pico de 2,5 mm (ambiente pouco refletivo)

### 3.2.3 Resultados

O conjunto de experimentos demonstrou que sempre foi possível detectar oscilações a partir de 3 mm de amplitude e frequência acima de 0,2 Hertz, com um desvio padrão menor que  $\pm 1$  mm, caso a observação ocorra em um ambiente considerado pouco ruidoso. Levando-se em consideração o tipo de equipamento e as características do ambiente, relacionadas com o multicaminhamento, pode-se concluir que utilizando uma antena GPS externa simples, num ambiente altamente afetado pelo multicaminhamento, não é possível detectar deslocamentos com amplitude menor que 3 mm. Por outro lado, num ambiente pouco ruidoso é possível detectar um deslocamento de 3 mm, de amplitude pico a pico, mas o desvio padrão obtido não oferece a precisão mínima requerida para medidas de engenharia. Já com a utilização de uma antena choke-ring foi possível detectar oscilações de amplitude de 2,5 mm, com desvio padrão de  $\pm 0,8$  mm, no local considerado altamente ruidoso e totalmente susceptível a degradações causadas pelo multicaminhamento. E no ambiente considerado pouco ruidoso, o desvio padrão caiu para  $\pm 0,5$  mm. A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados.

Vale ressaltar que não se está fazendo comparação entre as antenas nem quanto aos seus fabricantes, e sim, em relação à presença de elementos que atenuam os efeitos do multicaminhamento.

TABELA 3 – Resultados obtidos para os experimentos dinâmicos com GPS

Ambiente	Antena	Amplitude (mm)	Desvio padrão (mm)
muito refletivo	Simples	3,0	-----
pouco refletivo	Simples	3,0	1,4
muito refletivo	Choke-ring	2,5	0,8
pouco refletivo	Choke-ring	2,5	0,5

## 4. CONCLUSÕES

A análise das fontes de erros no modelo matemático da dupla diferença de fase entre dois pontos próximos, apresentada na primeira parte deste trabalho, permitiu concluir que a principal causa de degradação dos dados é a presença de multicaminhamento. O experimento na barragem permitiu constatar aquela afirmação mostrando que cuidados devem ser tomados para evitar o multicaminhamento e que o uso de mais pontos de referência se mostrou eficaz sugerindo ser esta estratégia a ser adotada como padrão no controle estático de deslocamentos. Embora o desvio padrão das medidas estáticas com o GPS seja uma ordem de grandeza superior ao desvio das medidas com nível geométrico, não se deve descartar o seu uso para detectar a ocorrência de recalques centimétricos nos casos em que haja impossibilidade de se usar o nível geométrico.

Os deslocamentos dinâmicos podem ser detectados por meio da análise espectral. O multicaminhamento também influi nos resultados, podendo haver casos em que chega a inviabilizar a detecção. Neste trabalho constatou-se um limiar de 3 mm de detecção de oscilações com frequência acima das frequências de influência do multicaminhamento, independente do local e do tipo de antena.

Embora muitos estudos e pesquisas ainda precisem ser realizados sobre a influência do multicaminhamento se pode afirmar, atualmente, que o GPS pode ser considerado um equipamento de medida adequado para a determinação da amplitude, com precisão milimétrica, e da frequência da componente fundamental de um deslocamento dinâmico.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelos dados convencionais fornecidos pela Divisão de Topografia da CESP - Companhia Energética de São Paulo; ao Departamento de Transportes da Escola Politécnica da USP pelo empréstimo dos receptores *Topcon-Javad Positioning Systems (JPS) Legacy* com antenas *JPS Regant\_SD\_E\_SD\_E* choke-ring, a empresa SP Geosistemas, localizada na cidade de São Carlos, pelo empréstimo dos receptores Leica SR530 e antenas AT502 e a CAPES pela bolsa de Pós-Doutorado concedida para a autora.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, P.A. e Gemael, C. (2001). Análise de Deslocamento em uma Mina a Céu Aberto. **Revista Brasileira de Cartografia**. Nº. 53, pp. 92-96, dezembro 2001.
- Braasch, M.S. (1996). Multipath Effects. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cap. 14, Vol. 1, edited by B. Parkinson; J. Spilker Jr.;



- P. Axelrad and P. Enge, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, D.C.
- Breumso, S. (2001). Deformation Measurement on Bridge and Tunnel of the Fixed Link between Sweden and Denmark. **Proceedings**, 10<sup>th</sup> FIG International Symposium on Deformation Measurements. 19-22 March 2001, California, USA.
- Brigham, E.O. (1974). **The Fast Fourier Transform**. Prentice-Hall, Inc. Primeira Edição. New Jersey. Cap. 1, pp. 1-8.
- Brown, C. J., R. Karuna, V. Ashkenazi, G. W. Roberts, R. Evans (1999). Monitoring of Structures using GPS. **Proceedings**, Institution of Civil Engineers, Structures, ISSN 0965 092X, February 1999. pp. 97-105.
- CESP (1994). Companhia Energética do Estado de São Paulo. Permissão para realização de ensaios nas barragens.
- Chen, Y.Q.; Chrzanowisk, A.; Secord, J.M. (1990). A Strategy for the Analysis of the Stability of Reference Points in Deformation Surveys. **CISN Journal ACSGC**, Vol. 44, No. 2, Summer 1990, pp. 141 to 149.
- Duffy, M.A.; Hill, C.; Whitaker, C.; Chrzanowski, A.; Lutes, J.; Bastin, G. (2001). An Automated and Integrated Monitoring Program for Diamond Valley Lake in California. **Proceedings**, 10<sup>th</sup> International Symposium on Deformation Measurements. 19-22 March 2001. Orange, California, USA.
- Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J. (1997). **Global Positioning System: Theory and Practice**. Springer, Berlin Heidelberg, New York.
- Larocca, A.P.C. (2004a). O Uso do GPS como Instrumento de Controle de Deslocamentos Dinâmicos de Obras Cíveis – Aplicação da Área de Transportes. São Carlos. 203 p. **Tese** (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Larocca, A.P.C. (2004b). Using High-Rate GPS Data to Monitor the Dynamic Behavior of a Cable-Stayed Bridge. **Proceedings**, 17<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Long Beach, California, September 2004.
- Larocca, A.P.C. and R.E. Schaal (2005). Millimeters in Motion – Dynamic Response Precisely Measured. **GPS World**. Vol. 16, No. 1, Jan. 2005, pp. 16-24.
- Leick, A. (1995). **GPS Satellite Surveying**. John Wiley and Sons Ltd. Second Edition. Printed in USA.
- Meng, X.; Roberts, G.W.; Cosser, E.; Dodson, A.H. (2003). Real-Time Bridge Deflection and Vibration Monitoring Using an Integrated GPS/Accelerometer/Pseudolite System. **Proceedings**, 11<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.
- Nakamura S. (2000). “GPS Measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements.” **Journal of Structural Engineering**, ASCE, 126 (12), 1413-1419.
- Roberts, G. W.; Meng, X.; Dodson, A. H. (2001). Data Processing and Multipath Mitigation for GPS/Accelerometer Based Hybrid Structural Deflection Monitoring system. Deformation Measurements and Analysis. **Proceedings**, 14<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 11-14 September 2001, Salt Lake City, USA.
- Roberts, G.W.; Cosser, E.; Meng, X.; Dodson, A. (2004). Monitoring the Deflections of Suspension Bridges Using 100 Hz GPS Receivers. **Proceedings**, 17<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Long Beach, California, September 2004.
- Schaal, R.E and N. Pacilé (2000). Quantifying Multipath Using MNR Ratios. **GPS Solutions**. Vol. 3, No. 3, pp. 44-48.
- Schaal, R.E. (1998). Medições de Deslocamentos em Obras Cíveis de Grande Porte com GPS. Proposta de Metodologia de Análise dos Resultados e Tratamento dos Dados. São Paulo. 113p. **Tese** (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Schaal, R.E. and A.P.C. Larocca (2002). A Methodology for Monitoring Vertical Dynamic Sub-Centimeter Displacements with GPS. **GPS Solutions**. Vol. 5, No. 3, pp. 15-18.
- Tranquilla, J.M.; Carr, J.P.; Al-Rizzo, H.M. (1994). Analysis of a choke ring groundplane for multipath control in global positioning system (GPS) applications. **Proceedings IEEE AP**, vol AP-42, No. 7, pp. 905–911.

## 6. BIOGRAFIA

**Ricardo Ernesto Schaal** é graduado em Engenharia Eletrônica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Desenvolveu atividades no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e na Universidade Presbiteriana Mackenzie. É Professor Associado no Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, onde desenvolve pesquisas com aplicações do GPS no controle dinâmico de estruturas; no desenvolvimento de método de medida para a emissão de gases no meio urbano; no auxílio a projetos de infraestrutura de estradas e no cadastro urbano e rural.

**Ana Paula C. Larocca** é graduada em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). Recebeu seu título de Doutor, em 2004, pelo Departamento de Transportes da EESC-USP. Realizou estágio no *Department of Geodesy and Geomatics Engineer-*

*ing* da *University of New Brunswick*, Canadá, em 2003. Teve um artigo selecionado pelo *Institute of Navigation* (ION), como vencedor da competição de estudantes, em setembro de 2004. Atualmente, é Pós-Doutoranda pela CAPES, no Departamento de Transportes da EESC-USP.