
ENSAIOS EM LINHA DE BASE GPS DE CURTA DISTÂNCIA COM VISTAS À MEDIÇÃO DE RECALQUE EM ESTRUTURAS

PABLO JOAQUIM CATAI CARDOSO
TARCÍSIO FERREIRA SILVA
ADMILSON DA PENHA PACHÊCO
ALESSANDRO RHADAMEK ALVES PEREIRA

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Departamento de Cartografia, Recife - PE
pablo@bol.com.br
tarcisifs@yahoo.de
admilpp@ufpe.br
alessandro_rhadamek@hotmail.com

RESUMO - Dentre as técnicas de posicionamento altimétrico utilizadas na Geodésia, o nivelamento geométrico de precisão e o posicionamento GPS têm sido largamente empregados em casos onde, pelo menos, exista um ponto estável como referência. As suas aplicações vão desde investigação de fenômenos globais, como os fenômenos geodinâmicos, até as investigações locais tais como o monitoramento de recalque em estruturas da construção civil, subsidência de solos, entre outros. O objetivo deste trabalho é verificar a capacidade de detecção de pequenos deslocamentos verticais com a utilização da instrumentação GPS, em linha de base de curta distância, validando os resultados com pequenas variações altimétricas, controladas por dispositivo micrométrico de medição de deslocamento vertical acoplado a uma das antenas dos dois receptores. O processamento das observações GPS foi realizado em programa comercial, apresentando indicativos de qualidade para o uso da frequência L1 e duração das sessões superiores a seis horas de observação. Todo o experimento realizado nas estruturas prediais envolvidas ficou condicionado ao controle metrológico das mesmas, com a aplicação de um rigoroso nivelamento geométrico de precisão, na qual analisando, pontualmente, a variação das cotas, observou-se, que não houve movimento vertical significativo entre as duas épocas de medição realizadas.

ABSTRACT - Among the techniques of positioning altimétrico used in Geodésia, the geometric leveling of precision and the positioning GPS have been used broadly in cases where, at least, exist a stable point as reference. Their applications are going from investigation of global phenomena, as the phenomena geodynamics, to such local investigations as the monitoring of it represses in structures of the building site, subsidence of soils, among others. The objective of this work is to verify the capacity of detection of small vertical displacements with the use of the instrumentation GPS, in line of base of short distance, validating the results with small variations altimetrics, controlled by device micrometric of measurement of vertical displacement coupled one of the antennas of the two receivers. The processing of the observations GPS was accomplished in commercial program, presenting indicative of quality for the use of the frequency L1 and duration of the superior sessions at six hours of observation. The whole experiment accomplished in the involved property structures was conditioned to the control metrological of the same ones, with the application of a rigorous geometric leveling of precision, in the which analyzing, on time, the variation of the quotas, was observed, that there was not significant vertical movement among the two measurement times accomplished.

1 INTRODUÇÃO

Dentre as técnicas de posicionamento altimétrico utilizados na Geodésia, o nivelamento geométrico de precisão e o posicionamento GPS têm sido largamente utilizados. As suas aplicações vão desde investigação de fenômenos globais, como por exemplo, fenômenos geodinâmicos, a investigações locais tais como,

monitoramento de recalque em estruturas, subsidência de solos, entre outros.

O nivelamento geométrico de precisão é, tradicionalmente, o método mais preciso e o mais empregado na determinação de movimentos verticais de campo de pontos. O posicionamento altimétrico GPS subcentimétrico exige a aplicação de técnicas refinadas de observação e processamento dos dados, que na maioria

dos casos, são pouco acessíveis a grande parte dos interessados nas medições de recalque.

No presente trabalho foram conduzidos experimentos em altimetria GPS com vistas às aplicações na área da engenharia relacionadas ao emprego de deslocamentos verticais de edificações que possam ser associadas à pelo menos uma posição de referência estável localizada, por questão de custo operacional para as empresas, a uma pequena distância da área de estudo, utilizando-se de programáticas acessíveis a usuários não geodestas especializados. Para isto, empregou-se o método de posicionamento relativo estático com uma linha de base GPS na Cidade do Recife de comprimento igual à distância entre o prédio da estação RBMC-RECF e o prédio da Escola de Engenharia CTG-UFPE.

O objetivo do presente trabalho é verificar a capacidade de detecção de recalque de edificações empregando-se instrumentação GPS em linha de base de curta distância com cálculos geodésicos realizados em software comercial, validando-se os resultados GPS com os resultantes de pequenas variações altimétricas induzidas e controladas por dispositivo micrométrico de medição de deslocamento vertical acoplado a uma das antenas dos dois receptores.

Todo o experimento conduzido nas estruturas prediais envolvidas ficou condicionado as considerações de um possível deslocamento vertical sofrido pelos dois prédios durante os procedimentos de medição e que foi determinada por rigoroso controle metrológico a partir do emprego repetitivo do método geodésico do nivelamento geométrico de precisão com controle de pré e pós-calibração pelo método de *Kukkamäkki*. O controle geodésico dos deslocamentos verticais exigiu a instalação de um campo de pontos altimétrico em cada uma das estruturas prediais envolvidas.

2 ASPECTOS GEODÉSICOS SOBRE A MEDIÇÃO ALTIMÉTRICA

2.1 Sistema altimétrico local

O sistema altimétrico local envolve normalmente uma pequena porção limitada da superfície terrestre quando comparados com as redes regionais e nacionais e é composto por um campo de pontos distribuído na região de interesse. As altitudes dos pontos que compõem este sistema estão vinculadas à Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (RA-SGB) podendo, em alguns casos serem referenciados a pontos materializados em *benchmark's*, afloramentos rochosos, pilares, soleiras de edificações, etc. Segundo Silva et al., (2004), de grande importância é a estabilidade do campo de pontos de referência. Neste sentido, informações da área geológica e geotécnica são fundamentais para a correta localização do campo de pontos de referência.

Outra modalidade de sistema altimétrico local abrange extensões menores restringindo-se a pequenos corpos como edificações e obras de arte da construção civil. Nestes casos, os campos de pontos estão vinculados

a referenciais locais. Estes sistemas normalmente são concebidos para dar apoio às atividades de obras de engenharia restritas a extensões de quadras e até bairros, construções tais como pontes, pequenas barragens, etc., onde as alturas dos pontos de referência e pontos objeto demandam apenas um significado geométrico. Tal procedimento é recomendado apenas para campo de pontos cuja extensão não exceda os limites onde se possa desprezar a influência das variações da gravidade.

O acompanhamento da estabilidade dos pontos de referência que compõem o sistema local é um fator fundamental para aplicações que envolvem séries de observações altimétricas temporais de objetos sujeitos a movimentos verticais. A estas aplicações, podemos citar investigação de recalque na construção civil, investigação de subsidência em áreas de extração de água, gás, petróleo, ou minérios, obras de drenagem, etc. Alteração na posição altimétrica de pontos de referência irá se refletir nos pontos-objeto conduzindo a conclusões errôneas sobre o comportamento real do objeto (Chen, 1994; Silva et al., 2004).

2.2 Definição e cálculo do campo de pontos altimétrico local

Os campos de pontos, no processo de medição de deformação, são conjuntos de pontos interligados e classificados como de referência e objeto (Genneti, 1990; Silva et al., 2004).

- **Campo de pontos de referência:** tem a finalidade de dar a referência de medição e com isso monitorar o objeto com respeito ao seu redor, é formado por um conjunto de pontos intencionalmente preparados para definirem um sistema altimétrico de medição estável. A localização destes pontos varia em função da geometria do objeto a ser monitorado e das condições que favorecem a execução das medições tais como segurança, acessibilidade, estabilidade, dificuldade para monumentalização, vibrações, condições locais climáticas e geodinâmicas predominantes, etc..
- **Campo de pontos-objeto:** tem a finalidade de delinear o objeto, ou seja, discretizar os objetos envolvidos na investigação que podem ser entendidos como superfícies e/ou estruturas. A localização deve fornecer a melhor correspondência possível com o contínuo em estudo de maneira que se possam interpolar os resultados de deformações identificadas espacialmente.

2.2.1 Cálculo pelo método dos mínimos quadrados

Neste método, as altitudes dos pontos pertencentes à rede vertical do campo de pontos em estudo, assim como uma estimativa da precisão em cada época de medição, são calculadas individualmente pelo método paramétrico de ajustamento, podendo esta rede conter ou

não uma referência fixa. Quando fixamos uma referência, dizemos que a estrutura geodésica é hierárquica (Niemeier, 2002; Silva et al., 2004). Todas as alturas da rede neste modelo são incorporadas como parâmetros no modelo de *Gauss-Markov* (Romão et al., 2003; Hekimoglu et al., 2002; Chen, 1990; Niemeier, 1985):

$$l_k + v_k = A_k \cdot x_k \quad (1)$$

$$P_k = \sigma_0^2 \cdot Q_{l_k}^{-1} \quad (2)$$

Onde: k se refere à época de medição; v_k são o $n \times 1$ vetores dos resíduos; A_k é a $n \times u$ matriz dos coeficientes; x_k é o $u \times 1$ vetor das correções aos parâmetros; l_k é o $n \times 1$ vetor das observações; P_k é a $n \times n$ matriz dos pesos das observações; Q_{l_k} é a $n \times n$ matriz dos cofatores; u é o número de parâmetros (igual ao número de pontos na rede vertical), enquanto n é o número de observações; σ_0^2 é a variância da unidade de peso a priori.

Quando a condição $V_k^T \cdot P_k \cdot V_k = \text{mín}$ é satisfeita, o vetor dos parâmetros estimados pode ser calculado com a expressão:

$$\hat{x}_k = -Q_{\hat{x}_k \hat{x}_k} A_k^T P_k l_k \quad (3)$$

$$Q_{\hat{x}_k \hat{x}_k} = (A_k^T P_k A_k)^{-1} \quad (4)$$

Onde $Q_{\hat{x}_k \hat{x}_k}$ é a matriz das equações normais.

Quando nenhuma referência é fixada, ou seja, quando a estrutura geodésica em estudo é livre de condicionamentos, o ajustamento é chamado de ajustamento livre e $Q_{\hat{x}_k \hat{x}_k}$ passa a sofrer uma deficiência de característica ou singularidade. A matriz das equações normais é escrita com a seguinte notação:

$$Q_{\hat{x}_k \hat{x}_k} = \sigma_0^2 (A_k^T P_k A_k)^+ \quad (5)$$

Com o sinal (+) indicando uma pseudo-inversa das equações normais. A pseudo-inversa é um caso especial das inversas generalizadas. Mais detalhes podem ser encontrados em Gemael (1994).

2.3 Determinação altimétrica de pontos

Durante séculos o nivelamento geométrico tem sido o método mais preciso e acessível à grande maioria dos usuários que o empregam nas tarefas de construir, assim como de monitorar movimento vertical de objetos na superfície terrestre. O GNSS tem se afirmado com suas tecnologias complementares para utilização em trabalhos de altimetria. Nos tópicos a seguir, a definição e as características principais do posicionamento GPS pelo método de posicionamento relativo e do nivelamento geométrico são descritas.

a) Posicionamento GPS

Um dos grandes avanços nas técnicas de posicionamento é o sistema de posicionamento por satélites denominado *NAVSTAR-GPS*. Neste sistema, as coordenadas dos pontos são obtidas através do rastreamento e processamento dos sinais enviados pela constelação de satélites que orbitam ao redor da Terra. O princípio básico

de navegação consiste na medida de distâncias entre o usuário e os satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites num sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites (Monico, 2000).

Há três tipos de sinais envolvidos no GPS: as portadoras (L1 e L2), os códigos C/A e P(Y) e os dados (navegação, relógio, almanaque, etc.). Os sinais dos satélites não penetram em vegetação densa, vales estreitos, cavernas ou na água. Montanhas altas ou edifícios próximos também afetam sua precisão. Existem outras fontes de erros que afetam os receptores: a interferência ionosférica (é o atraso sofrido quando um sinal de rádio percorre os elétrons livres na ionosfera); sinais com caminhos múltiplos (quando o sinal é refletido antes de chegar ao receptor ocasionando um atraso); erro do relógio do receptor (sincronia com o satélite); erros de órbita (efemérides); números de satélites visíveis (quanto maior melhor a precisão); geometria dos satélites (posição relativa dos satélites a qualquer hora).

A precisão obtida nos posicionamentos com o GPS depende da minimização dos erros sistemáticos, aleatórios e dos ruídos que afetam as medidas de pseudodistâncias baseadas na medida da fase do código e da fase da portadora. Adiciona-se a todos estes erros, os oriundos da instabilidade dos tripés, instalação e centragem das antenas GPS nas estações de observação e do seu centro de fase.

Com base nas descrições dos erros envolvidos, alguns procedimentos e aspectos relevantes para o método relativo estático escolhido para os experimentos são aqui apresentados: comprimento da linha de base; taxa de coleta dos dados; tempo de observação; máscara de elevação; quantidade de satélites visíveis; utilização de antenas do mesmo modelo orientadas na mesma direção; e a utilização de receptores com dupla frequência.

b) Nivelamento geométrico

O nivelamento geométrico realiza a medida da diferença de nível entre pontos do terreno por intermédio de leituras correspondentes a visadas horizontais, obtidas com um nível, em miras colocadas verticalmente nos pontos de interesse. Através deste princípio as leituras podem ser transportadas sucessivamente de um ponto para outro (nivelamento composto), ou seja, parte-se de um ponto de altitude conhecida e determina-se o desnível até o próximo ponto, obtendo-se assim a altitude deste (Jordan, 1944). A formulação matemática é dada por:

$$\Delta H_{AB} = \sum_{i=1}^n \Delta H_i \quad (6)$$

Onde: ΔH_{AB} → Diferença de nível entre os pontos A e B; $\Delta H_i = l_{R\acute{e}} - l_{V\text{ante}}$ → Diferença de nível obtida em cada estação; $l_{R\acute{e}}$ → Leitura da mira de ré; $l_{V\text{ante}}$ → Leitura da mira de vante.

Para grandes distâncias, a diferença de nível passa a ser afetada pelo potencial gravitacional. O eixo de colimação do nível em cada sessão deve ser perpendicular

à vertical do ponto onde o instrumento está instalado. Sendo assim, ele é paralelo à superfície equipotencial daquele ponto. Isso gera erros na medida de diferença de nível entre dois pontos separados por uma grande distância, pois as superfícies equipotenciais não são paralelas ao geóide (Hoar, 1982).

Os valores obtidos no nivelamento geométrico estão sujeitos a erros sistemáticos e aleatórios. Os sistemáticos consistem de erros provocados pela curvatura da Terra, refração atmosférica e descalibração do instrumento. Os efeitos destes erros podem ser modelados, corrigidos computacionalmente ou minimizados seguindo alguns procedimentos de campo, como por exemplo, o comprimento das visadas e a equidistância entre as miras. Os erros aleatórios ocorrem no nivelamento do nível, nivelamento da mira, leitura da graduação da mira e acuidade visual do operador (Wolf e Ghilani, 1997).

Um erro sistemático que merece destaque é erro de colimação, pois ocorre quando a linha de visão do instrumento não está na horizontal, é geralmente corrigido por meio de um procedimento desenvolvido por Kukkamäki baseado na determinação de uma constante “c” que representa o valor da correção que deve ser feita na retificação do instrumento (Kahmen e Faig, 1988) que é descrito como segue.

1º) Determina-se um alinhamento contendo quatro pontos A, B, I e II, como mostra a figura 1, separados das seguintes distâncias: IA = s, IB = s, IIA = 4s e IIB = 2s, com s = 10 m;

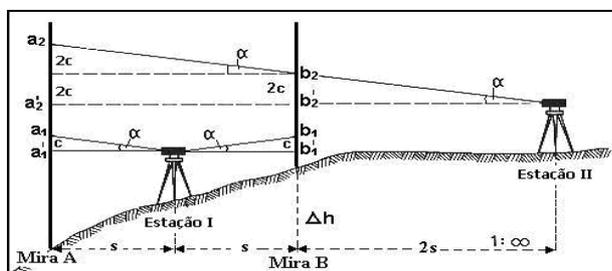


Figura 1 – Método de Kukkamäki para verificação do eixo de visada do nível. Fonte: Adaptado de Kahmen e Faig, 1988.

2º) O nível é centralizado na estação I situado entre duas miras devidamente niveladas sobre os pontos A e B. Com o instrumento nivelado, obtêm-se as leituras a₁ e b₁. Se o instrumento estiver inclinado de um ângulo α em relação à horizontal, ambas as leituras estarão erradas na mesma proporção com valor igual a: c = s*(α / ζ). O erro c é corrigido quando subtraímos os valores das leituras a₁ e b₁, para encontrar a diferença de nível Δh_{AB}. Assim, se a'₁ e b'₁ representarem as leituras corretas, temos:

$$\Delta h_{AB} = (a'_1 - b'_1) = (a_1 - b_1) \quad (7)$$

3º) O mesmo instrumento é colocado na estação II, a uma distância de 2s do ponto B, e as leituras a₂ e b₂ são obtidas respectivamente na mira em A e B. As leituras obtidas conterão erros proporcionais à distância da mira. A leitura a₂ estará errada de um valor equivalente a 4c e a

leitura b₂ de um valor equivalente a 2c. Com isso podemos determinar o valor do erro c:

$$a_2 = \Delta h_{AB} + b_2 + 2c = a_1 - b_1 + b_2 + 2c \quad (8)$$

Ou

$$2c = (a_2 - b_2) - (a_1 - b_1) \quad (9)$$

Conseqüentemente, deve-se atuar na posição da cruz filar do aparelho, alterando a sua posição de tal maneira que as seguintes leituras sejam obtidas:

$$a'_2 = a_2 - 4c \quad (10)$$

Ou

$$b'_2 = b_2 - 2c \quad (11)$$

Uma checagem final deve ser feita com a cruz filar na nova posição e os seguintes valores devem ser obtidos:

$$a'_2 - b'_2 = a_1 - b_1 = \Delta h_{AB} \quad (12)$$

Este método pode ser adotado como pré e pós-calibração do conjunto nivelante formado por nível, tripé, miras e sapatas. Outros métodos formulados em normas internacionais existem como os das Normas ISO e DIN e, no entanto, não serão agora e aqui abordados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Na busca de um sistema de referência de medição altimétrico local utilizou-se de conceitos da Geodésia Aplicada e da Metrologia. Os experimentos altimétricos realizados caracterizam-se pela escolha da configuração geométrica de dois campos de pontos objeto e respectivamente suas monumentalizações em estruturas da construção civil presentes no campus da UFPE em Recife - PE sobre as quais estão apoiadas as estações experimentais GPS e devidamente monitoradas por nivelamento geométrico de precisão. Ao todo, treze pontos foram escolhidos, sendo dez adequadamente monumentalizados para receberem observações decorrentes do nivelamento geométrico e mais três para as observações GPS. Todos foram rigidamente fixados para evitar a introdução de erros provocados por folgas. As duas edificações utilizadas para a definição dos campos de pontos foram:

- O prédio da Biblioteca Central (BIB/UFPE) com sete pontos monumentalizados, sendo seis deles distribuídos nos pilares ao redor do prédio para receberem observações de nivelamento geométrico, e um pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do IBGE, chamado RBMC/RECF, utilizado como receptor natural das observações GPS;
- O prédio da administração do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG/UFPE) onde seis pontos foram monumentalizados, sendo quatro deles distribuídos nos pilares do prédio para receberem observações de nivelamento geométrico, e dois utilizados nos experimentos de recepção GPS.

3.2 Contextualização do problema e metodologia empregada

Como validar metrologicamente a sensibilidade altimétrica detectada com o instrumental GPS, de acordo com determinados critérios de qualidade e metodologias refinadas de medição de modo a garantir a estabilidade das estruturas envolvidas no processo de medição ao longo do tempo?

O pressuposto da metodologia, apresentada na figura 2, é o estudo da detecção de movimentos verticais através da instrumentação GPS, com linha de base de curta distância validando-se os resultados encontrados com um dispositivo padrão de medição de deslocamento vertical. Este controle metrológico local é amparado paralelamente pelo controle geodésico das estruturas prediais por meio de um rigoroso nivelamento geométrico de precisão.



Figura 2 – Fluxograma da metodologia empregada.

3.3 Primeiro experimento: Levantamento GPS

O posicionamento GPS foi realizado utilizando o método de posicionamento relativo estático entre dois pontos formando uma linha de base medindo aproximadamente 425,0 m. O primeiro ponto (figura 3) está situado na cobertura do prédio da Biblioteca Central (RBMC/RECF), enquanto o segundo ponto, identificado como MOVE (figura 4), foi materializado em alvenaria sobre um pilar com dispositivo de centragem fixa chumbado sobre o teto de medição do CTG/UFPE que se apóia sobre uma sólida parede circular de alvenaria assentada sobre a placa de cobertura do prédio.



Figura 3 – RBMC/RECF, antena instalada na parte superior do prédio da Biblioteca Central - UFPE.



Figura 4 – Esquema de observação no ponto MOVE.

A técnica de observação utilizada foi o posicionamento relativo estático, com taxa de coleta de 15 segundos, máscara de elevação de 15°. Ambas as antenas utilizadas nas observações são equipadas com acessórios para redução dos efeitos do multicaminho e foram orientadas na mesma direção durante o período de observação. Em resumo, os equipamentos utilizados nas observações foram um receptor TRIMBLE 4000 SST (com todos os seus acessórios), antena 4000 SST L1/L2 (Ground Plane), base niveladora, dispositivo de medição para o deslocamento da antena (figura 5). A antena localizada no ponto MOVE foi submetida a um preciso movimento vertical, procedimento ilustrado na figura 5, auxiliado pelo dispositivo, com uma taxa de (-5 mm) a cada sessão de observação até completar um deslocamento vertical total de 50 mm em 11 sessões.

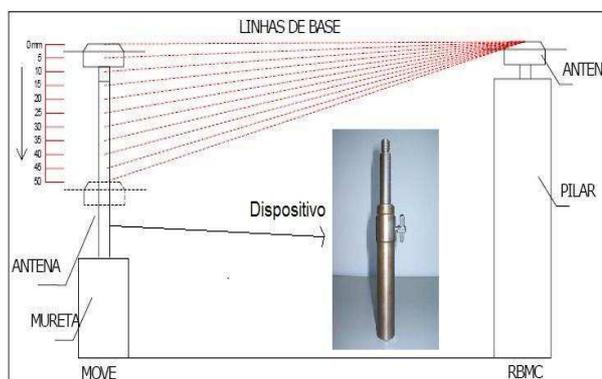


Figura 5 – Geometria do deslocamento vertical utilizando o dispositivo de medição.

O dispositivo de medição de deslocamento padrão consiste de um tubo cilíndrico com uma haste coaxial graduada, ambos feitos de metal, que pode movimentar-se livremente na vertical controlada por uma trava lateral.

A antena é conectada à parte superior do dispositivo e sua altura é controlada pela escala graduada em milímetros na haste coaxial. O deslocamento padrão de 5 mm deu-se a cada 10 horas em 10 épocas consecutivas.

Os dados de cada época de observação GPS foram processados utilizando o programa comercial GPSURVEY, onde as opções de processamento foram: Duplas diferenças com solução fixadas na observável L1; Utilização de efemérides transmitidas; Utilização das informações meteorológicas padrão transmitidas.

3.4 Segundo experimento: Nivelamento geométrico

O experimento GPS descrito funciona sobre o pressuposto de que as antenas receptoras não devem ter qualquer movimento relativo entre si, exceto aqueles que façam parte do próprio experimento. Portanto, a estabilidade vertical dos dois pontos definidores da linha de base foi, paralelamente às medições GPS, investigada com respeito à sua estabilidade utilizando nivelamento geométrico. Este tipo de controle metrológico exigiu a implantação de dois campos de pontos ligados entre si por circuitos de nivelamento geométrico de precisão. O primeiro campo de pontos foi monumentalizado em seis pilares do prédio da Biblioteca Central, onde se situa o ponto RBMC/RECF, e o segundo campo de pontos foi monumentalizado em quatro pilares do prédio do CTG/UFPE. A figura 6 ilustra a localização dos campos de pontos no campus da UFPE e os circuitos de nivelamentos percorridos.

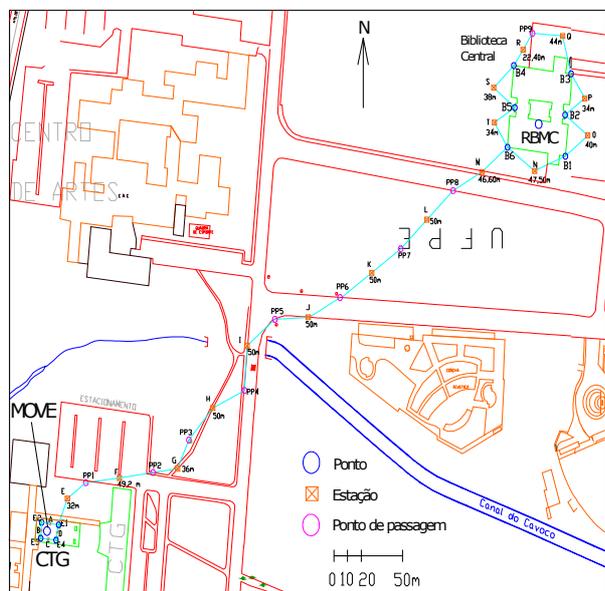


Figura 6 – Nivelamento geométrico envolvendo a Biblioteca e o CTG/UFPE.

As medições de nivelamento geométrico foram efetuadas em dois períodos: a primeira medição realizada no dia 14/04/05 chamada de medição zero, e a segunda medição realizada no dia 03/05/05 chamada de primeira época. O experimento GPS foi realizado entre este período, nos dias 19/04/05 e 29/04/05.

Os três circuitos definidos são: Circuito 1 – Início em E1 seguindo por E2, E3, E4 e fechando em E1; Circuito 2 – Nivelamento de E1 a B6 e contranivelamento de B6 a E1; Circuito 3 - Início em B6 seguindo por B1, B2, B3, B4, B5 e fechando em B6.

No processo do nivelamento foram adotadas as recomendações para levantamentos altimétricos estabelecidos pela Resolução PR-22 (Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos - IBGE), e NBR-13133 (Execução de Levantamento Topográfico -

ABNT), com o intuito de minimizar os efeitos e propagação de erros sistemáticos.

No controle instrumental foram realizadas etapas de pré-calibração e pós-calibração, pelo método de *Kukkamäki*, corrigindo os erros de colimação, tanto no sistema ótico, como no sistema eletrônico, tendo suas leituras automaticamente corrigidas, validando assim as medições realizadas.

O método utilizado para cálculo das cotas finais foi o ajustamento por mínimos quadrados pelo método paramétrico, sendo elaborado uma rotina de cálculo no programa *MATLAB 5.0*.

A seqüência para o cálculo obedeceu as seguintes fases: Transferência dos dados coletados para planilha *Excel*; Correção dos erros sistemáticos do eixo de colimação, refração atmosférica e curvatura; Cálculo das diferenças de nível provisórias ($D_{n_{CALC}}$); Cálculo do erro de fechamento E_f (mm); Cálculo da tolerância para o erro de fechamento σ_{TOL} (mm), para levantamentos de precisão; Cálculo da classificação da precisão do levantamento $\sigma_{Niv/Km}$ (mm/km); Cálculo das diferenças de nível compensadas empiricamente ($D_{n_{COMPE}}$); Cálculo das cotas de cada ponto utilizando as diferenças de nível compensadas empiricamente; Cálculo das cotas de cada ponto pelo método dos parâmetros utilizando rede hierárquica, assim como rede livre, com rotinas geradas no *MATLAB 5.0*.

Os equipamentos empregados foram: um nível automático NI 2, marca *ZEISS*; uma placa plano-paralela com graduação milimétrica, marca *ZEISS*; uma mira de invar marca *NEDO* (escala centimétrica com dupla graduação); um tripé não rígido, novo e sem folgas, marca *TRIMBLE*, várias peças de monumentalização (figura 7), parafusos, chave de fenda e resinas à base de epóxi.

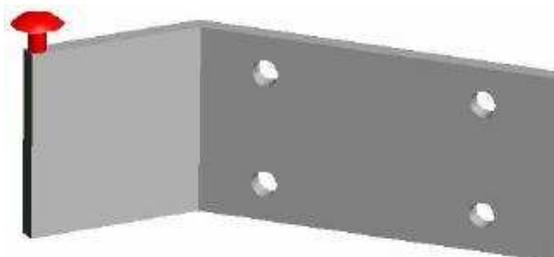


Figura 7 – Peça de monumentalização dos pontos de nivelamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados obtidos no levantamento GPS

O tempo de observação das sessões de 10 horas foi subdividido em 2, 4, 6, 8 e 10 horas aproximadamente e a solução processada com ambigüidade fixada na observável L1 com duplas diferenças de fase.

Uma linha de regressão linear foi traçada para comparar a tendência de movimento vertical do conjunto de dados observados por GPS com o deslocamento vertical padrão, os resultados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise de regressão linear para 2, 4, 6, 8, 10 horas.

Horas de Rastreio	Análise de regressão linear		Preditor	Equação de regressão ($Y = \beta_0 + \beta_1 x$)				Intervalo de confiança	
	α	R^2		Coef.	Erro pad.	Stat-t	Valor-P	Significância 95% Inferior	Superior
2	12,0	70	β_0	17,73	6,77	2,61962	0,02783	2,42	33,04
			β_1	-5,22	1,14	-4,56195	0,00136	-7,81	-2,63
4	11,9	70	β_0	15,5	6,7	2,24399	0,05151	-0,12	30,21
			β_1	-5,15	1,13	-4,54821	0,00139	-7,72	-2,59
6	9,9	79	β_0	11,27	5,61	2,00837	0,07553	-1,42	23,97
			β_1	-5,49	0,95	-5,78751	0,00026	-7,64	-3,34
8	6,5	0,89	β_0	4,45	3,65	1,24605	0,2442	-3,71	12,8
			β_1	-5,24	0,62	-8,49225	0,00001	-6,63	-3,84
10	5,4	0,92	β_0	4,41	3,07	1,43437	0,18528	-2,54	11,36
			β_1	-5,46	0,52	-10,51549	0,00000	-6,64	-4,29

Os gráficos, mostrados nas figuras 8 a 12, apresentam uma comparação entre as variações de altura observadas com GPS e os deslocamentos verticais padrão. Os deslocamentos padrão descrevem um segmento de reta com coeficiente linear (β_0) igual a zero e coeficiente angular (β_1) igual a -5,0 mm. Nestes gráficos, o desvio-padrão de cada altura observada obtida no processamento das observações GPS está representado através de barras verticais.

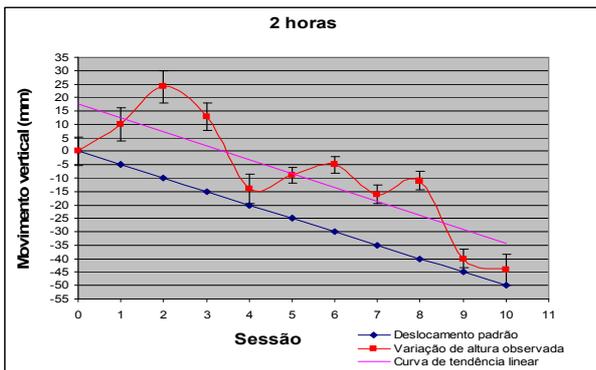


Figura 8 - Deslocamento vertical padrão e o observado para 2 horas.

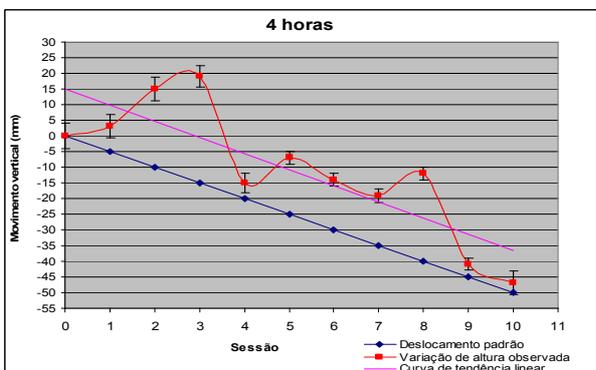


Figura 9 - Deslocamento vertical padrão e o observado para 4 horas.

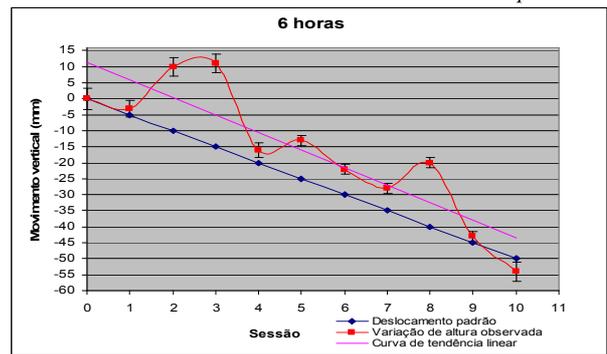


Figura 10 - Deslocamento vertical padrão e o observado para 6 horas.

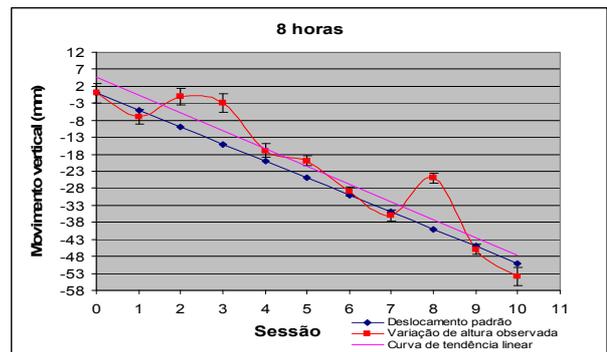


Figura 11 - Deslocamento vertical padrão e o observado para 8 horas.

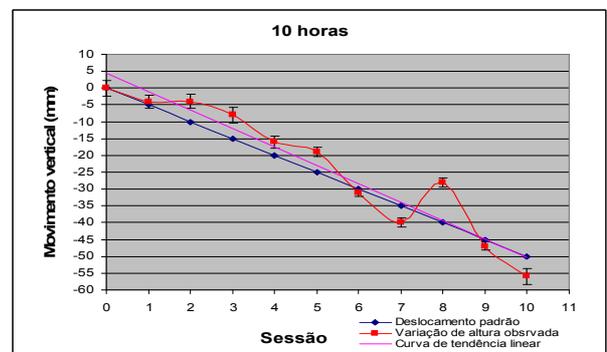


Figura 12 - Deslocamento vertical padrão e o observado para 10 horas.

Algumas discussões podem ser realizadas por meio da análise da regressão linear:

- À medida que a duração da sessão de observação cresce, o desvio-padrão obtido na regressão linear tende a diminuir, este estimador de precisão indica que a dispersão das observações em torno da linha de regressão diminui à medida que a duração da sessão de observação aumenta.
- À medida que o tempo de observação aumenta, há uma maior correlação entre os dados observados GPS com uma curva de tendência linear, o que pode ser visto a partir do coeficiente de determinação linear (R^2) que se aproxima da unidade.

- Pode-se notar que à medida que a duração da sessão de observação aumenta, o coeficiente angular β_1 permanece praticamente em torno do valor padrão $\beta_1 = -5$ mm. Por outro lado, a qualidade da linha de regressão melhora o que pode ser visto pelos valores dos erros-padrão e da amplitude dos intervalos de confiança que tendem a diminuir. O coeficiente linear β_1 diminui, mas não chega à situação ideal que seria o valor padrão $\beta_1 = 0$ mm. Os erros-padrão obtidos e as amplitudes dos intervalos de confiança na sua estimação também tendem a diminuir, confirmando uma melhora da qualidade da linha de regressão.

4.2 Validação do Experimento GPS por Meio do Nivelamento Geométrico

As campanhas de nivelamento foram realizadas em condições climáticas típicas da região da planície do Recife com dia ensolarado, sendo que a medição zero pela manhã e primeira época à tarde. O valor do erro de colimação (c) obtido na calibração do instrumento no Laboratório de Metrologia e Posicionamento (LAMEP/UFPE) pelo método de *Kukkamäki*, o comprimento do circuito percorrido, o erro de fechamento de cada circuito, a tolerância para o erro de fechamento e a precisão do nivelamento em cada circuito são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Indicadores das duas campanhas de medição de nivelamento geométrico.

Levantamento	Medição zero (14/04/05)			Primeira época (03/05/05)		
	1	2	3	1	2	3
c (mm/m)	c = 0,002 mm/m			c = -0,007 mm/m		
Circuito	1	2	3	1	2	3
Comprimento (km)	0,052	0,828	0,26	0,052	0,828	0,26
Erro de fech. (mm)	0,1	-1,2	-0,17	0,1	-0,1	0,35
Tolerância (mm)	0,46	1,82	1,02	0,46	1,82	1,02
Precisão (mm/km)	0,44	-1,32	-0,34	0,44	0,11	0,69

Através das formulações do ajustamento pelos mínimos quadrados e inversas matriciais generalizadas, utilizou-se algumas rotinas computacionais no programa *MATLAB* 5.0 para o cálculo das cotas ajustadas pelo método paramétrico.

No caso da estrutura altimétrica hierárquica, atribuiu-se ao ponto E1, como sendo isento de incertezas na estrutura (ponto fixo) neste ajustamento.

As tabelas 3 e 5 apresentam os valores ajustados para as diferenças de nível cotas, encontrados nos diversos processos de cálculo, sendo que nas Tabelas 4 e 6 fornecem além das cotas, o desvio-padrão calculado para cada ponto em cada época de medição.

Tabela 3 e 4 – Diferenças de nível e cotas calculadas pelo MMQ (Hierárquico).

Lance	Zero (14/04/05)		1ª época (03/05/05)		Ponto	Cotas (mm)			
	Dif. de Nível	Desv. Pad.	Dif. de Nível	Desv. Pad.		Zero (14/04/05)		1ª época (03/05/05)	
						Cota	Desv. Pad.	Cota	Desv. Pad.
E1-E2	35,12	0,08	35,27	0,05	E1	10000,00	0,00	10000,00	0,00
E2-E3	-0,52	0,08	-0,45	0,05	E2	10035,12	0,08	10035,27	0,05
E3-E4	13,27	0,08	13,10	0,05	E3	10034,60	0,09	10034,83	0,05
E4-E1	-47,87	0,08	-47,92	0,05	E4	10047,87	0,08	10047,92	0,05
E1-B6	-627,33	0,38	-627,68	0,22	B6	9372,68	0,38	9372,33	0,22
B6-B1	73,23	0,16	73,44	0,09	B1	9445,91	0,41	9445,76	0,24
B1-B2	191,53	0,15	190,80	0,09	B2	9637,43	0,43	9636,56	0,24
B2-B3	-230,68	0,14	-230,20	0,08	B3	9406,76	0,43	9406,36	0,25
B3-B4	-63,98	0,18	-63,59	0,11	B4	9342,78	0,42	9342,77	0,24
B4-B5	131,48	0,15	131,50	0,09	B5	9474,25	0,40	9474,27	0,23
B5-B6	-101,58	0,14	-101,95	0,08					
B6-E1	627,33	0,38	627,68	0,22					

Tabela 5 e 6 – Diferenças de nível e cotas calculadas pelo MMQ (Livre de condicionamentos).

Lance	Zero (14/04/05)		1ª época (03/05/05)		Ponto	Cotas (mm)			
	Dif. de Nível	Desv. Pad.	Dif. de Nível	Desv. Pad.		Zero (14/04/05)		1ª época (03/05/05)	
						Cota	Desv. Pad.	Cota	Desv. Pad.
E1-E2	35,12	0,10	35,27	0,06	E1	10000,00	0,29	10000,00	0,17
E2-E3	-0,52	0,10	-0,45	0,06	E2	10035,12	0,30	10035,27	0,17
E3-E4	13,27	0,10	13,10	0,06	E3	10034,60	0,30	10034,83	0,17
E4-E1	-47,87	0,10	-47,92	0,06	E4	10047,87	0,30	10047,92	0,17
E1-B6	-627,33	0,46	-627,68	0,26	B6	9372,68	0,20	9372,33	0,12
B6-B1	73,23	0,20	73,44	0,11	B1	9445,91	0,24	9445,76	0,14
B1-B2	191,53	0,19	190,80	0,11	B2	9637,43	0,26	9636,56	0,15
B2-B3	-230,68	0,17	-230,20	0,10	B3	9406,76	0,26	9406,36	0,15
B3-B4	-63,98	0,23	-63,59	0,13	B4	9342,78	0,25	9342,77	0,15
B4-B5	131,48	0,18	131,50	0,10	B5	9474,25	0,23	9474,27	0,13
B5-B6	-101,58	0,17	-101,95	0,10					
B6-E1	627,33	0,46	627,68	0,26					

As precisões encontradas demonstram que os levantamentos atenderam aos requisitos de levantamento de alta precisão requerida em trabalhos de monitoramento de deslocamentos verticais em estruturas da construção civil.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento com linha de base GPS de curta distância, aproximadamente 425,0 m, revelou que as sessões com duração superiores a seis horas de observação, processadas em programa comercial com o uso da frequência L1, apresentaram resultados muito relevantes para serem aplicados na detecção de movimento vertical de pontos com precisões sub-centimétricas. Os resultados obtidos na análise estatística da regressão linear e das barras verticais do desvio-padrão confirmaram essa característica.

O desvio-padrão da linha de regressão apresentou uma tendência decrescente chegando aos valores finais de $\pm 6,5$ mm nas sessões de 8 horas (total de 88 horas em 11 sessões) e $\pm 5,4$ mm nas sessões de 10 horas (total de 110 horas em 11 sessões) com uma incerteza de 95%.

Na comparação das diferenças de nível GPS com os deslocamentos padrão imposto à antena, encontraram-se regressões lineares com características muito interessantes para os coeficientes β_1 e β_0 . O coeficiente β_1 permanece praticamente com o valor padrão imposto pela

metrologia (-5,0 mm) desde o experimento de 11 sessões com 2 horas de observação, até o experimento de 11 sessões com 10 horas de observação. Já com relação a β_0 , a situação não foi tão favorável, uma vez que a reta do deslocamento padrão condiciona o valor 0,0 milímetros para este coeficiente, que na linha de regressão variou de $17,73 \pm 6,77$ mm para as sessões de 2 horas, e até $4,41 \pm 3,07$ mm para as sessões de 10 horas.

Tais resultados indicam que o procedimento descrito nos experimentos pode ser empregado na identificação de movimento vertical de pontos com no mínimo de 11 sessões de 2 horas (22 horas de observação) para a identificação da tendência do movimento, e 11 sessões de 10 horas (110 horas de observação) na determinação deste movimento, sob o pressuposto da estabilidade do ponto de referência.

Com relação ao controle metrológico da estabilidade das estruturas prediais por meio do nivelamento geométrico de precisão, analisando pontualmente a variação das cotas, observa-se, pelos resultados obtidos, que não houve movimento vertical significativo entre as duas épocas de medição realizadas, pois as cotas dos pontos, entre as épocas, variaram na casa dos décimos de milímetros.

As técnicas de calibração de níveis, oriundas de metodologias utilizadas no LAMEP/DECART, juntamente com os procedimentos de cálculo pelo método dos mínimos quadrados, apesar de já dominadas há alguns anos, praticamente impõem um padrão metodológico para medições e cálculos altimétricos de alta precisão.

REFERÊNCIAS

CHEN, D. (1994). **Development of a fast ambiguity search filtering (FASF) method for GPS carrier phase ambiguity resolution**. Department of Geomatics Engineering, UCGE, University of Calgary, Alberta, Canada, Reports Number 20071, December.

GEMAEL, C. (1994). **Introdução ao ajustamento de observações**. Editora UFPR. Curitiba-PR. 319p.

GENNETI, A. J. (1990). **Survey markers and monumentation**. Engineering and Design: Department of the Army, US Army Corps of Engineers. Washington DC. 54p.

HEKIMOGLU, S.; DEMIREL, H.; AYDIN, C. (2002). **Reliability of the conventional deformation analysis methods for vertical networks**. In: Proc. FIG XXII Int. Congress, Washington - DC.

HOAR, G. J. (1982). **Satellite surveying: theory, geodesy and map projections**. Application, equipment and operations: Magnavox, Torrance, California.

JORDAN, W. (1944). **Tratado General de Topografia**. Ed. Gustavo Gili S. A., Vol II, Barcelona. 572p.

KAHMEN, H.; FAIG, W. (1988). **Surveying**. Walter de Gruyter: Berlin - New York. 578p.

MONICO, J. F. G. (2000). **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, fundamentos e aplicações**. Ed. UNESP. 287p.

NIEMEIER, W. (1985). **Deformationsanalyse**. In: Pelzer, H. (Hrsg.): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II.*, Wittwer, Stuttgart, 1985, p.559-623.

NIEMEIER, W. (2002). **Ausgleichsrechnung**. Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. Walter de Gruyter, Berlin, New York. 407p.

ROMÃO, V. M. C.; SANTOS, A. A.; DE SEIXAS, A.; SILVA, A. S.; SILVA, T. F.; SANTOS, S. M. (2003). **Metodologia para determinação de subsidência de solo na região metropolitana de Recife**. Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba - PR. p.1-12.

SILVA, T. F.; De SEIXAS, A.; ROMÃO, V. M. (2004). **Conceituação de campo de pontos na medição de deformação de objetos**. I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife. p. 1-7.

WOLF, P. R., GHILANI, D. C. (1997). **Adjustment computations – statistics and least squares in surveying and GIS**. John Wiley & Sons, Inc. New York. 564p.