

ESTABELECIMENTO DE REDES GEODÉSICAS LOCAIS DE ALTA PRECISÃO PARA O MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES DA CROSTA: ESTUDO DE CASO DE UMA BARRAGEM DE USINA HIDRELÉTRICA

Establishing local geodetic networks of high precision for monitoring crust deformations: a case study of a hydroelectric usine dam

NIEL NASCIMENTO TEIXEIRA
LUIZ DANILÓ DAMASCENO FERREIRA

Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Departamento de Geomática – Laboratório de Geodésia Espacial
nielnt@ufpr.br; luizdanilo@ufpr.br

RESUMO

O monitoramento de movimentos da crosta utilizando, especificamente, técnicas geodésicas constitui uma importante ferramenta para o controle e a segurança de estruturas – naturais ou artificiais. O Sistema de Posicionamento Global tem sido utilizado no estabelecimento de redes geodésicas de alta precisão ativas e passivas para aplicações em geodinâmica. Sendo assim, podem ser identificadas na literatura aplicações do GPS no monitoramento de movimentos da crosta a nível global, continental, regional e local. Deste modo, apresenta-se neste trabalho os fatores envolvidos no estabelecimento de uma rede geodésica de alta precisão para o monitoramento de movimentos da crosta utilizando o GPS. Também serão apresentados os resultados e conclusões obtidas.

Palavras-chaves: Redes Geodésicas; Movimentos da Crosta; Sistema de Posicionamento Global.

ABSTRACT

The monitoring of crust movements using, specifically, geodetic techniques constitutes an important tool for the control and the security of structures – natural or artificial. Global Positioning System has been used in the establishment of active and passive geodetics networks of high precision for applications in geodynamics. GPS applications in the monitoring of movements of the crust can be found in the literature at global, continental, regional and local levels. Then, the involved factors

in the establishment of a geodetic network of high precision for the monitoring of movements of the crust using the GPS. Results and conclusions will be presented.

Keywords: Geodetic Networks; movements of the crust; Global Positioning System.

1. INTRODUÇÃO

Com a possibilidade de operar independentemente de condições meteorológicas, fornecendo posicionamento tridimensional, aliados a sua alta precisão – 1 a 0,1ppm, ou melhor do que isto, para o posicionamento relativo estático – e aos custos relativamente baixos envolvidos na aquisição de seus receptores, a tecnologia GPS tem sido utilizada em uma variada gama de atividades que necessitam de posicionamento, dentre elas encontra-se a Geodinâmica, especificamente, no que diz respeito ao monitoramento de movimentos da crosta, onde esta tecnologia tem sido aplicada a nível global, continental, regional e local.

No âmbito global, tem-se como maior exemplo, a rede do International GPS Service (IGS), composta por mais de 300 estações distribuídas em todo o planeta, rastreando continuamente os satélites GPS. A partir desta rede, as deformações da crosta terrestre são monitoradas globalmente, são providos os parâmetros de rotação da Terra, e as velocidades de suas estações são utilizadas para calcular “mapas de tensão” (stress) global e para determinar as componentes do vetor de rotação ($\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$) das placas tectônicas (HOFMANN-WELLENHOF, 2001, p.320-324; SEEBER, 2003, p. 363-365).

Em aplicações continentais, cita-se o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), criado em 1995, na qual foram rastreadas 58 estações. Uma nova campanha de levantamentos GPS ocorreu em 2000, rastreando-se 184 estações. Estimou-se os vetores velocidade de todas as estações rastreadas em ambas as épocas. Das 184 estações pertencentes ao SIRGAS atualmente, 20 estações coletam dados de forma contínua. Estes dados são incluídos no conjunto de dados do IGS Regional Network Associate Analysis Center – South America (RNAAC – SIR), o qual fornece informações contínuas a respeito de movimentos da placa Sul-americana (SEEBER, 2003, p. 364). Detalhes podem ser vistos em IBGE (1997).

Predição de terremotos é um dos objetivos da aplicação do GPS no monitoramento de movimentos da crosta a nível regional. Muitos projetos concebidos com este objetivo encontram-se em fase de operação em várias regiões tectonicamente ativas do planeta. Dentre estes projetos cita-se: o GPS Earth Observation NETwork (GEONET); o South American Geodynamic Activities (SAGA); o Southern California Integrated GPS Network (SCIGN) e o Geodynamics of South and South-East-Asia (GEODYSSSEA). Detalhes a respeito

destes projetos podem ser vistos em SEEGER (2003), HOFMANN-WELLENHOF (2001) e MONICO (2000).

1.1 Aplicações em Âmbito Local

No que diz respeito a aplicações locais, o GPS tem sido utilizado no monitoramento de estruturas (ou em sua região) feitas pelo homem, ou por ele modificadas, como por exemplo, a formação de grandes reservatórios nas barragens de UHE, áreas de extração de água, petróleo e minérios. Em muitas aplicações desta natureza, as distâncias entre as estações de referência e as estações de monitoramento são pequenas, podendo ser alcançadas precisões milimétricas e detectadas deformações de pequena magnitude (SEEGER, 2003, p. 365). Como este trabalho repousa neste tipo de aplicação, dois exemplos serão vistos na seqüência.

TEIXEIRA (2001) realizou uma pesquisa com o objetivo de avaliar a viabilidade do GPS na detecção de deslocamento vertical. Para consecução deste objetivo, foi projetado um dispositivo denominado de “Base para Deformações”, que possibilita a simulação de deslocamentos verticais positivos e negativos. Utilizando-se 11 estações da rede GPS pertencente à Companhia Paranaense de Energia (COPEL), os deslocamentos verticais simulados, eram rigorosamente medidos com um paquímetro, e posteriormente comparados com os obtidos com o GPS. As observações GPS foram processadas no programa computacional PRISM da Ashtech. Utilizaram-se várias ferramentas estatísticas para a detecção de deslocamentos e de erros nas observações, como por exemplo, o Teste Data Snooping, Confiabilidade e Sensibilidade. A diferença média entre os deslocamentos medidos com o paquímetro e os obtidos com o GPS foi de 1,08cm. Deste modo, com base nos resultados obtidos, e levando em conta que os dados foram processados em um programa comercial, a aplicação do GPS com vistas à detecção de deslocamentos verticais mostrou-se promissora.

A falha do monte Carmel é uma das maiores estruturas geológicas do norte de Israel. Esta falha é caracterizada por atividades sísmicas intensas e contínuas, o que faz com que esta região seja considerada como potencialmente perigosa. Deste modo, EVEN-TZUR (2003) implantou uma rede geodésica consistindo de 17 estações, distribuídas em uma área de $\approx 30 \times 40$ km, na região do monte Carmel, com o objetivo de monitorar seus movimentos verticais. Foram realizadas várias campanhas de levantamentos GPS, nesta rede, entre os anos de 1990 e 1999. Com o intuito de validar os resultados obtidos por meio do GPS, foram conduzidas duas campanhas de nívelamento geométrico na referida rede. No entanto, não houve diferenças significativas entre os resultados obtidos pelo GPS e os obtidos pelo nívelamento geométrico. Os resultados finais demonstraram que o monte Carmel eleva-se a uma taxa de 5mm/ano.

Muitos outros exemplos de aplicações GPS no monitoramento de movimentos em estruturas, a nível local, podem ser encontrados na literatura, como por exemplo:

- Monitoramento de pontes (CHAVES, 2001);
- Monitoramento de deslizamento de terra (DEPENTHAL e SCHMITT, 2003);
- Monitoramento de minas a céu aberto (FORWARD et al., 2003);
- Monitoramento de barragens (KONTNY et al., 2003);
- Monitoramento de edifícios (CHAVES, 2001);
- Monitoramento de deformação dinâmica de estruturas, com o propósito de determinar vibrações estruturais (NICKITOPOLOU et al., 2003);
- Fornecimento de informações tridimensionais para o controle de movimento de corpo rígido e vibrações elásticas de uma estrutura (TEAGUE et al., 1995);
- Análise da estabilidade de redes locais (FERREIRA e GARNÉS, 2000).

Deste modo, este trabalho tem como objetivo apresentar os fatores envolvidos no estabelecimento de uma rede geodésica local de alta precisão para o monitoramento de movimentos da crosta utilizando o GPS.

2 MONITORAMENTO GEODÉSICO DE MOVIMENTOS DA CROSTA EM BARRAGENS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

A formação de grandes reservatórios nas barragens de Usinas Hidrelétricas (UHE) pode induzir a deformações na Crosta Terrestre, bem como, ocasionar sismos em regiões anteriormente assísmicas. Este fenômeno é conhecido como Sismicidade Induzida por Reservatórios – SIR (GUPTA e RASTOGI, 1976). A formação de um novo reservatório artificial altera as condições estáticas das formações rochosas do ponto de vista mecânico (em virtude do próprio peso da massa da água), e do ponto de vista hidráulico (em consequência da infiltração do fluido na subsuperfície, que causa pressões internas nas camadas rochosas profundas). A combinação destas duas ações pode gerar sismos, caso as condições locais sejam propícias. Há décadas acreditava-se que os reservatórios artificiais só podiam gerar sismos de pequena magnitude. No entanto, a literatura tem mostrado inúmeros exemplos de terremotos, alguns catastróficos, associados com a formação de grandes reservatórios em barragens de UHE, como por exemplo (GUPTA e RASTOGI, 1976):

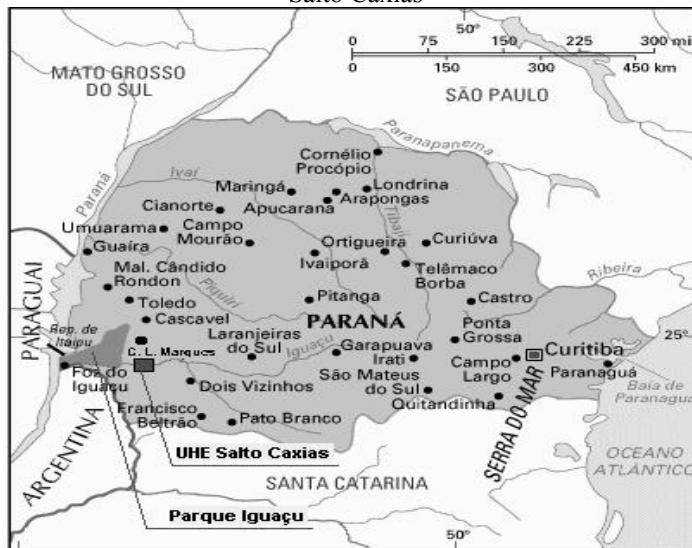
- Barragem de Boulder no Rio Colorado/EUA (1935); e
- Barragem de Koyna/Índia (1967).

Deste modo, o monitoramento geodésico de movimentos da crosta constitui uma importante etapa dos programas de predição de terremotos. Todavia, o principal questionamento destes programas, com respeito ao SIR, é se os terremotos que ocorrem nas proximidades dos grandes reservatórios são causados pelo aumento da pressão dos fluidos e/ou do peso da massa d'água. Sendo assim, os levantamentos geodésicos realizados antes e após o enchimento de reservatórios

artificiais, podem ajudar a responder esta questão, o que já tem sido feito em várias partes do mundo. No Brasil, iniciativas como esta têm sido executadas, por meio de convênio entre a Universidade Federal do Paraná (UFPR), através do Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica (LAIG) e do Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE), e a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), a qual construiu uma série de UHE ao longo do Rio Iguaçu. Assim, este convênio permitiu a realização de monitoramento geodésico de movimentos da crosta na região de algumas destas usinas, onde foram utilizados dados de Nivelamento, da Gravimetria e do Global Positioning System (GPS). Atualmente, estes dois laboratórios têm concentrado inumeráveis esforços para monitorar a região da UHE de Salto Caxias, também situada no Rio Iguaçu, no município de Capitão Leônidas Marques, a 600 km de Curitiba.

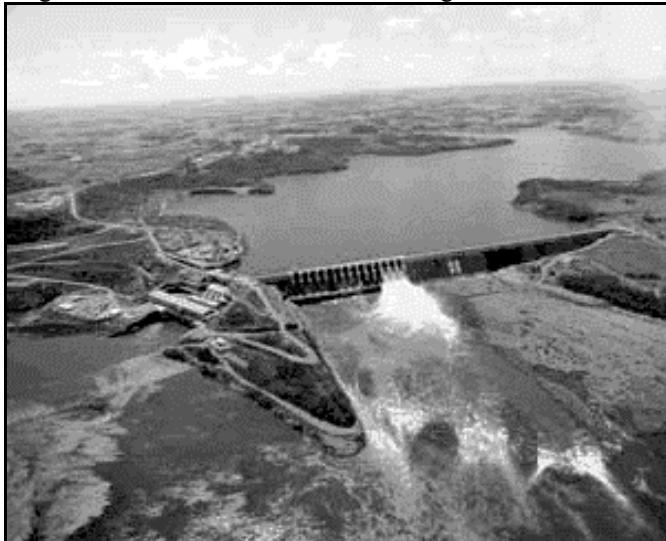
A figura 2.1 mostra o mapa do estado do Paraná com a localização da cidade de Capitão Leônidas Marques e a UHE de Salto Caxias.

Figura 2.1 – Localização da Cidade de Capitão Leônidas Marques e da UHE de Salto Caxias



A UHE de Salto Caxias é a maior Barragem de Concreto Compactado a Rolo (CCR) da América do Sul, a 8^a Barragem em volume d'água no mundo com 3,6 x 10⁹ m³, e possui 67 m de altura e 1083 m de comprimento, sendo a terceira maior usina da COPEL, menor apenas que as de Foz do Areia e Salto Segredo, abrangendo uma superfície de 131 km². Tais características permitem o desencadeamento de um processo sismogênico na região da Barragem. A Figura 2.2 mostra a vista panorâmica da Barragem de Salto Caxias.

Figura 2.2 – Vista Panorâmica da Barragem de Salto Caxias



3 REDE GEODÉSICA LOCAL DE SALTO CAXIAS

Inicialmente, foram projetados, pela COPEL 97 Referências de Nível (RRNN), sendo que destas, quatro seriam selecionadas para servirem aos propósitos de Pontos de Apoio (PA), e outras dez para Pontos de Controle (PC). No entanto, deste contingente, implantou-se apenas 87 RRNN, selecionando-se destas, três PA e dez PC, os quais formam a rede geodésica local de Salto Caxias, perfazendo, assim, um total de 13 estações. A Figura 3.1 mostra a configuração geométrica da rede geodésica local de Salto Caxias

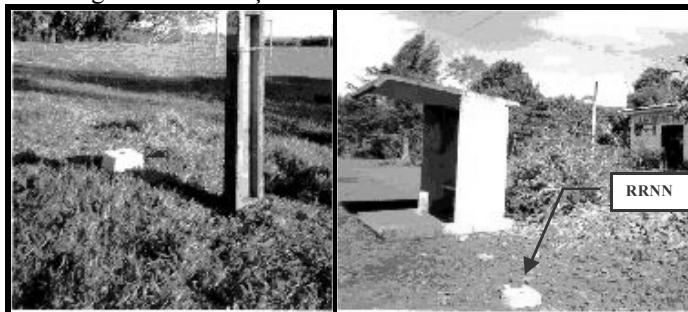
Figura 3.1 – Configuração Geométrica da Rede Geodésica Local de Salto Caxias



Esta rede está distribuída em um quadrilátero de aproximadamente 35x35km, todos as estações foram monumentadas de forma a facilitar sua identificação e atender as exigências de estabilidade, acesso, dimensões específicas, etc.

Para implantação destas estações seguiu-se as mesmas especificações técnicas daquelas utilizadas no projeto de auscultação geodésica da região da Barragem de Bento Munhoz da Rocha (GEMAEI e DOUBECK, 1982): As estações foram concretadas no local apresentando forma tronco-piramidal, de seção quadrada, possuindo base superior de 30x30cm, e inferior de 45x45cm. A base inferior situa-se em geral, cerca de 1m abaixo da superfície; já a superior aflora cerca de 20cm. A figura 3.2 mostra duas estações desta rede.

Figura 3.2 – Estações da Rede Local de Salto Caxias



Isto se deve ao fato de que as características do solo em ambas as regiões são aproximadamente iguais. No entanto, para propósitos de monitoramento de movimentos da crosta com o GPS o ideal seria a implantação de marcos de centragem forçada. Mas não foram implantados tais marcos devido ao fato da concepção inicial ser o estabelecimento de uma rede de referências de nível para o nivelaamento geométrico.

3.1 Levantamento de Campo e Correção dos Fatores Geodinâmicos Intrínsecos

Foram realizadas duas campanhas para coleta das observáveis do GPS: a primeira campanha ocorreu no período de 5 a 10 de agosto de 1998 – antes do enchimento do reservatório, e a segunda no período de 16 a 20 de dezembro de 2002. Para a realização das duas campanhas, foram utilizados quatro receptores ASHTECH Z-XII, e um receptor TRIMBLE SSi.

As estações PA01, PA02 e PA03 foram posicionadas em função das estações PARA e UEPP, pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Estas duas estações pertencem também à Rede do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS). As coordenadas do SIRGAS estão referidas ao ITRF94, época 1995,4. Estas coordenadas podem ser vistas na tabela 3.1

Tabela 3.1 – Coordenadas Geodésicas e Cartesianas Geocêntricas das Estações PARA e UEPP, Época 1995,4

EST.	LATITUDE	LONGITUDE	ALT.
			GEOMÉTRICA (M)
PARA	-25°26'54,1291"	-49°13'51,4368"	925,7590
UEPP	-22°07'11,6594"	-51°24'30,7216"	430,9450
	X (m)	Y (m)	Z (m)
PARA	3.763.751,6390	-4.365.113,7680	-2.724.404,7550
UEPP	3.687.624,3100	-4.620.818,5710	-2.386.880,4070

No entanto, devido à variação temporal das coordenadas dos pontos localizados sobre a crosta terrestre em decorrência de aspectos geodinâmicos, é necessário que estas coordenadas sejam reduzidas à época das observações GPS, ou seja, para a época 1998,70 no caso da primeira campanha, e 2002,96 no caso da segunda campanha; após o processamento/ajustamento das observações, as coordenadas devem retornar à época SIRGAS (COSTA, 1999; DREWES e SÁNCHEZ, 2003). Esta redução pode ser feita utilizando modelos geofísicos de movimentos de placas. O modelo Geofísico indicado pelo International Earth Rotation Service (IERS) é o NNR-NUVEL-1 ou ainda a sua recente atualização NNR-NUVEL-1A (COSTA, 1999, p. 112).

As componentes das velocidades no sistema cartesiano das estações PARA e UEPP, segundo o modelo geofísico NNR-NUVEL-1A podem ser vistas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Componentes das Velocidades no Sistema Cartesiano, Segundo o Modelo Geofísico NNR-NUVEL-1A

VELOCIDADES - NNR-NUVEL-1A			
Estação	V _x (m/ano)	V _y (m/ano)	V _z (m/ano)
PARA	0,0003	-0,0061	0,0102
UEPP	-0,0004	-0,0057	0,0104

Fonte: COSTA (1999, p. 138).

A equação que permite a redução das coordenadas SIRGAS para a época na qual foi realizada a primeira campanha é dada por (COSTA, 1999, p. 154; MONICO, 2000, p. 97):

$$\mathbf{X}_i(t) = \mathbf{X}_i(t_0) + \mathbf{V}(t - t_0), \quad (1)$$

onde :

$\mathbf{X}_i(t)$: é o vetor de coordenadas, a serem reduzidas, das estações PARA e UEPP nas épocas $t = 1998,70$ e $t = 2002,96$;

$\mathbf{X}_i(t_0)$: é o vetor de coordenadas destas mesmas estações na época $t_0 = 1995,40$; e \mathbf{V} : é o vetor de suas velocidades.

Deste modo, utilizando-se as coordenadas cartesianas geocêntricas das estações PARA e UEPP, pertencentes ao SIRGAS época 1995,4 (tabela 3.1), juntamente com suas respectivas velocidades (tabela 3.2) na equação (6.1), reduziu-as às épocas 1998,70 e 2002,96, respectivamente. Estas coordenadas podem ser vistas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Coordenadas Cartesianas Geocêntricas das Estações PARA e UEPP, Épocas 1998,70 e 2002,96

ÉPOCA 1998,70			
EST.	X (m)	Y (m)	Z (m)
PARA	3.763.751,6400	-4.365.113,7881	-2.724.404,7213
UEPP	3.687.624,3087	-4.620.818,5898	-2.386.880,3727
ÉPOCA 2002,96			
EST.	X (m)	Y (m)	Z (m)
PARA	3.763.751,6413	-4.365.113,8141	-2.724.404,6779
UEPP	3.687.624,3070	-4.620.818,6141	-2.386.880,3284

Estas coordenadas foram utilizadas no processamento e ajustamento dos PA em ambas campanhas realizadas. Após o processamento/ajustamento, as coordenadas

dos PA obtidas em ambas as épocas foram reduzidas para a época SIRGAS 1995,40.

Os três PA foram rastreados utilizando o método de posicionamento relativo estático, com uma duração média de rastreio de 6 horas. Empregou-se uma taxa de coleta de dados de 15 segundos em virtude da compatibilidade com o intervalo adotado pelo IBGE para as Estações PARA e UEPP, valor este que é atualmente empregado em todas as estações da RBMC. Adotou-se ângulo de elevação de 10 graus para minimizar as degradações advindas da troposfera e do efeito do multicaminho.

A tabela 3.4 mostra o comprimento das linhas de base formadas entre as estações da RBMC e os PA. É importante salientar que estes comprimentos foram extraídos dos arquivos que contém os resultados do processamento da linha de base.

Tabela 3.4 – Comprimento das Linhas de Base (6hs de rastreio)

LINHA DE BASE	COMPRIMENTO (km)
PARA-PA01	436,30
PARA-PA02	432,20
PARA-PA03	414,10
UEPP-PA01	425,40
UEPP-PA02	459,00
UEPP-PA03	435,70

Os dez PC foram rastreados utilizando o método de posicionamento relativo estático, com uma duração média de rastreio de 3 horas, taxa de coleta de dados de 15 segundos e ângulo de elevação mínimo de 10 graus. Foram posicionados em função das estações PA01, PA02 e PA03. Na tabela 3.5 estão indicados os comprimentos das linhas de base formadas entre os PA e os PC para a primeira e segunda campanha.

Tabela 3.5 – Comprimento das Linhas de Base Formadas Entre os PA e os PC (3hs de rastreio)

LINHA DE BASE	COMPRIMENTO (km)	LINHA DE BASE	COMPRIMENTO (km)
PA01-PC207	11,3	PA02- PC611	24,4
PA01-PC403	18,7	PA02- PC506	28,0
PA01-PC712	30,9	PA03- PC207	23,1
PA01-PC611	23,3	PA03- PC403	18,0
PA01-PC506	15,3	PA03- PC712	8,6
PA01-PC109	7,2	PA03- PC109	29,6
PA01-PC318	16,4	PA03- PC318	21,9
PA01-PC807	24,2	PA03- PC807	9,2
PA01-PC310	10,6	PA03- PC310	23,8
PA01-PC615	26,7	PA03- PC615	6,5

3.2 Análise e Processamento das Observáveis GPS

Atualmente há diversos programas de processamento de dados GPS, científicos e comerciais, disponíveis no Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE) da UFPR. Dentre estes, optou-se pela utilização de um programa científico – BERNSE, Versão 4.2 – pois este permite um tratamento mais refinado quanto ao processamento de linhas de base, bem como, contempla a possibilidade de se traçar estratégias, seja na utilização de modelos troposféricos ou na aplicação de modelagens para resolução de ambigüidades.

As principais estratégias e opções adotadas – para obtenção de coordenadas de alta precisão – nos processamentos dos dados GPS neste trabalho foram:

- Órbitas precisas do IGS;
- Correções devido ao carregamento oceânico;
- Ambigüidades: para linhas de base menores que 10km utilizou-se a estratégia denominada no BERNSE de SEARCH, o qual refere-se ao algoritmo *Fast Ambiguity Resolution Approach* (FARA). Para linhas de base maiores que 10km utilizou-se a estratégia *Quasi-Ionosphere-Free* (QIF), conhecida também como L_3 . Estas duas estratégias são recomendadas pelo próprio programa.
- Orientação terrestre: foram adotadas soluções compatíveis com as órbitas IGS, segundo os arquivos ERP (*Earth Rotation Parameters*);
- Ionosfera: para linhas de base menores que 10km estimou-se a *priori* um modelo da ionosfera por meio do programa (IONEST), enquanto para linhas de base maiores, a ionosfera não foi modelada porque seus efeitos são eliminados mediante a combinação linear (L_3);
- Troposfera: o atraso dos sinais produzido pelo efeito da troposfera foi modelado a *priori* mediante ao modelo Saastamoinen, com os parâmetros meteorológicos fornecidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Esta estimativa a *priori* do atraso dos sinais foi somada as correções dos atrasos zenitais utilizando a função de mapeamento de Niell. Deste modo, calculou-se um parâmetro troposférico a cada 1 hora;
- Correção do centro de fase da antena do receptor: os deslocamentos de centro de fase da antena são valores recomendados pelo IGS, dependendo da combinação antena/receptor utilizada na observação.

3.2.1 Análise da Qualidade das Observáveis GPS

Antes do processamento das linhas de base procedeu-se à análise da qualidade das observáveis GPS que de acordo com HUGENTOBLER et al. (2001) pode ser analisada após o pré-processamento das medidas de simples diferença de fase (programa MAUPRP). Um dos indicadores desta análise é o *Root Mean Square* (RMS) da solução da tripla diferença de fase. Assim, para que as observáveis apresentem qualidade satisfatória é necessário que este indicador não seja maior que 1cm.

Deste modo, este indicador resultou menor que 1cm para todos as linhas de base formadas (1^a e 2^a campanha), exceto para as seguintes, em ambas as campanhas:

- PA01-PC403;
- PA03-PC403;

O quadro 3.1 mostra uma parte do arquivo de saída gerado pelo programa MAURP, referente à linha de base PA01-PC403 (2^a campanha).

Quadro 3.1 – Arquivo de Saída Gerado pelo Programa Mauprp

DATA SCREENING: PC403	03-MAR-03 10:43

*	
STATION 1: PA01	YEAR: 2002
STATION 2: PC403	DAY : 350
BASELINE LENGTH (M) :	18695.595
OBSERVAT. FILE NAME : P:\PC403\OBS\PAP40002.PSH	

TRIPLE DIFFERENCE SOLUTION	

FREQUENCY OF TRIPLE DIFF. SOLU.:	3
NUMBER OF TRIPLE DIFF OBS. USED:	1568
RMS OF TRIPLE DIFF SOLUTION (M):	1.996
COORDINATES NEW-A PRIORI X (M):	110.654 +- 57.427
Y (M):	-40.018 +- 47.719
Z (M):	100.527 +- 26.224

Os valores de RMS, obtidos pela solução da tripla diferença de fase, das linhas de base formadas pelo ponto PC403 podem ser vistos no quadro 3.2.

Quadro 3.2 – RMS da Solução da Tripla Diferença de Fase em Linhas de Base que Ultrapassaram o Valor de 1 Cm

1 ^a CAMPANHA		2 ^a CAMPANHA	
Linha de base	RMS (m)	Linha de base	RMS (m)
PA01-PC403	0,953	PA01- PC403	1,996
PA03- PC403	1,652	PA03- PC403	3,456

Pelo quadro 3.2 observa-se que os valores de RMS da tripla diferença de fase extrapolaram significativamente o valor de referência máximo (1cm). Observa-se também que o maior valor foi o da linha de base PA03-PC403 (2^a campanha), enquanto, o menor valor foi o da linha de base PA01-PC403 (1^a campanha).

3.2.2 Desvio Padrão das linhas de Base Processadas

Em vista disso, as ambigüidades destas linhas de base, ou seja, àquelas descritas no quadro 3.2, não foram resolvidas e nem fixadas na fase de processamento das linhas de base. As demais linhas de base formadas tiveram as ambigüidades resolvidas e fixadas. Os gráficos 3.1 e 3.2 mostram os desvios padrão das coordenadas X, Y, Z das linhas de base – formadas entre os PA e PC – processadas referentes a 1^a e a 2^a campanha, respectivamente.

Gráfico 3.1 – Desvios Padrão das Coordenadas X, Y, Z das Linhas de Base Processadas (1^a Campanha)

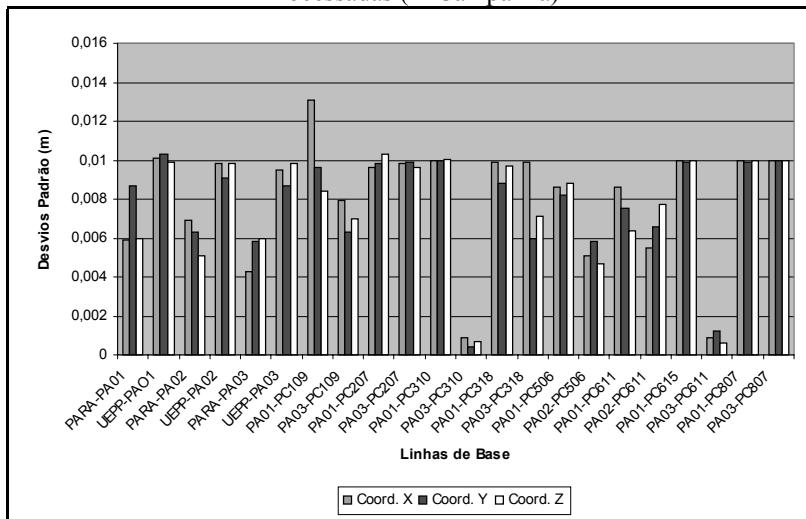
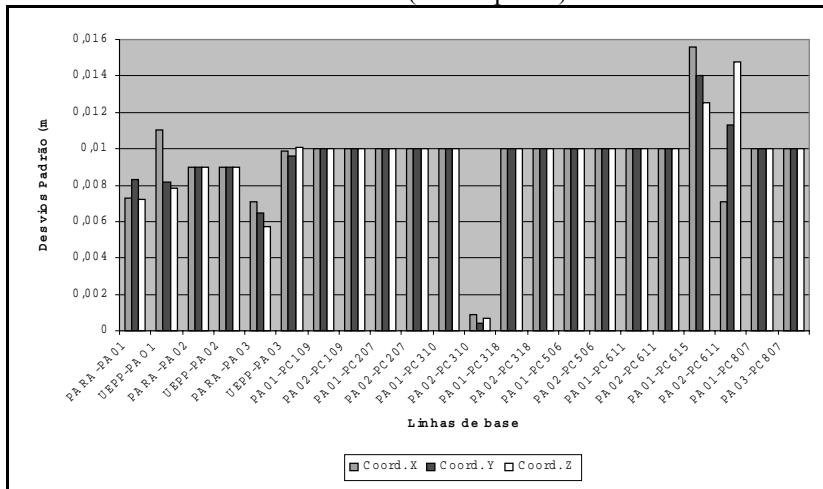


Gráfico 3.2 – Desvios Padrão das Coordenadas X, Y, Z das Linhas de Base Processadas (2^a Campanha)



Por meio dos gráficos 3.1 e 3.2 observa-se que:

- Os melhores resultados em termos de precisão foram aqueles advindos do processamento das linhas de base da 1^a campanha;
- A maioria dos desvios padrão da 1^a campanha foi menor do que 1cm;
- A maioria dos desvios padrão da 2^a campanha ficou em torno de 1cm;
- Existem, isoladamente, algumas melhorias de precisão da 2^a campanha com respeito à 1^a campanha como por exemplo, coordenadas Y, Z da linha de base UEPP-PA01, coordenadas X, Y, Z da linha de base UEPP-PA02 e coordenada X da linha de base PA01-P109.

3.3 Ajustamento da Rede Geodésica Local

Após processamento das linhas de base, procedeu-se ao ajustamento da rede geodésica local de Salto Caxias. No ajustamento de observações GPS pelo M.M.Q., uma consideração de extrema importância é a correlação matemática entre observações, que pode ser tratada de três maneiras (TEIXEIRA, 2001):

- 1) Ignorá-las;
- 2) Considerar o efeito individualmente para cada linha de base (correlação entre satélites); e
- 3) Considerar o efeito conjunto para cada linha de base.

A primeira e a segunda alternativa não requerem linhas de base observadas simultaneamente e, portanto, aplicam-se a processamento por linha de base individual, sendo amplamente utilizadas nos módulos de ajustamento em programas

comerciais de processamento de dados GPS. A terceira alternativa representa um tratamento mais rigoroso, visto que se aplica a linhas de bases observadas simultaneamente. O BERNSE 4.2, bem como, a maioria dos programas científicos de processamento de dados GPS, utilizam este tratamento para o ajustamento das observações.

Para o ajustamento dos PA foram injuncionadas as estações PARA e UEPP – pertencentes ao SIRGAS, enquanto que para o ajustamento dos PC, foram injuncionados os PA. Nas tabelas 3.6 e 3.7, observam-se as coordenadas cartesianas geocêntricas ajustadas dos PA e PC – referenciadas ao SIRGAS época 1995,4 – com seus respectivos desvios padrão, referentes a 1^a e 2^a campanha, respectivamente.

Tabela 3.6 – Coordenadas Cartesianas Geocêntricas Ajustadas com seus Respectivos Desvios Padrão (1^a Campanha) Referida a Época 1995,4

EST.	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)	Z (m)	σ_z (m)
PA01	3.423.787,8396	0,0013	-4.638.426,1978	0,0016	-2.720.122,6810	0,0010
PA02	3.417.101,4381	0,0007	-4.620.998,9114	0,0009	-2.757.742,8042	0,0006
PA03	3.435.437,4340	0,0015	-4.616.785,6084	0,0018	-2.742.149,2180	0,0012
PC109	3.420.644,1034	0,0027	-4.636.988,2596	0,0033	-2.726.429,3775	0,0021
PC207	3.423.897,3269	0,0012	-4.632.493,0969	0,0016	-2.729.755,9187	0,0011
PC310	3.430.646,4993	0,0023	-4.631.160,0851	0,0022	-2.723.822,8721	0,0016
PC318	3.435.835,0631	0,0053	-4.627.718,1258	0,0067	-2.723.175,3097	0,0044
PC506	3.425.636,8185	0,0018	-4.629.678,1164	0,0023	-2.732.523,2040	0,0014
PC611	3.430.854,5278	0,0013	-4.623.364,5159	0,0018	-2.736.448,3819	0,0012
PC615	3.432.874,9588	0,0034	-4.621.042,5817	0,0039	-2.738.195,5878	0,0027
PC807	3.433.989,8050	0,0021	-4.622.128,7452	0,0027	-2.734.783,7281	0,0018

Tabela 3.7 – Coordenadas Cartesianas Geocêntricas Ajustadas com seus Respectivos Desvios Padrão (2^a Campanha) Referida a Época 1995,4

EST.	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)	Z (m)	σ_z (m)
PA01	3.423.787,8270	0,0018	-4.638.426,1741	0,0024	-2.720.122,6768	0,0015
PA02	3.417.101,4276	0,0033	-4.620.998,8864	0,0043	-2.757.742,7814	0,0027
PA03	3.435.437,4296	0,0035	-4.616.785,6040	0,0043	-2.742.149,2152	0,0024
PC109	3.420.644,1257	0,0014	-4.636.988,2567	0,0019	-2.726.429,3790	0,0013
PC207	3.423.897,3338	0,0027	-4.632.493,0897	0,0085	-2.729.755,9267	0,0028
PC310	3.430.646,5726	0,0019	-4.631.160,1538	0,0041	-2.723.822,9279	0,0019
PC318	3.435.835,0633	0,0047	-4.627.718,1177	0,0037	-2.723.175,3093	0,0021
PC506	3.425.636,8304	0,0018	-4.629.678,0992	0,0023	-2.732.523,1976	0,0014
PC611	3.430.854,5189	0,0072	-4.623.364,5087	0,0097	-2.736.448,3749	0,0065
PC615	3.432.874,9315	0,0022	-4.621.042,5659	0,0026	-2.738.195,5835	0,0019
PC807	3.433.989,7951	0,0027	-4.622.128,7498	0,0064	-2.734.783,7330	0,0022

Observa-se por meio das tabelas 3.6 e 3.7 que os desvios padrão das coordenadas estão ao nível do milímetro, com exceção da estação PA02 (1^a campanha), com desvio padrão ao nível do décimo do milímetro. Pode-se observar também, que falta as coordenadas das estações PC403 e PC712. A estação PC403

não teve suas ambigüidades solucionadas – para ambas as épocas de observações, e a estação PC712 foi submersa no enchimento do reservatório.

Visando-se a análise estatística do desempenho do ajustamento, aplicou-se o teste global bilateral. Deste modo, analisou-se a qualidade dos ajustamentos, comparando o fator de variância a priori (σ_0^2) com o fator de variância a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) a um nível de confiança ($1 - \alpha$) de 95%, verificando-se assim, o desempenho de cada ajustamento, por meio do cálculo da estatística qui-quadrado (χ^{*^2}), empregada neste teste. Os resultados deste teste podem ser vistos na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Resultado do Teste Global Referente a 1^a e a 2^a Campanha

Ajustamento	Qui-Quadrado χ^{*^2}	$19,06 < \chi^{*^2} < 50,71$
1 ^a Campanha	46,40	Aceita
2 ^a Campanha	49,70	Aceita

Pode-se observar pela tabela 3.8 que os ajustamentos dos PA e PC referentes a primeira e a segunda campanha apresentaram desempenho satisfatório, o que provavelmente pode atribuir-se ao tempo de execução dos rastreios e as estratégias adotadas no processamento das observações.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho consistiu em apresentar os fatores envolvidos no estabelecimento de uma rede geodésica local de alta precisão para o monitoramento de movimentos da crosta utilizando o GPS. Tal objetivo foi alcançado por meio de duas campanhas de levantamentos GPS realizados sobre a RRNN implantadas região da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias.

No intuito de se obter coordenadas precisas e confiáveis alguns procedimentos foram adotados. O primeiro diz respeito à correção dos fatores geodinâmicos intrínsecos, como é o caso do movimento de placas litosféricas. Tal movimento impõe uma variação temporal das coordenadas dos pontos localizados sobre a crosta terrestre. Deste modo, para minimização deste fator reduziu-se as coordenadas das estações base – PARA e UEPP – à época das observações GPS, ou seja, para a época 1998,70 no caso da primeira campanha, e 2002,96 no caso da segunda campanha; após o processamento e ajustamento das observações, as coordenadas foram reduzidas à época SIRGAS novamente. Esta redução foi efetuada utilizando-se o modelo geofísico NNR-NUVEL-1A.

O segundo procedimento diz respeito a utilização de um programa científico de processamento e ajustamento das observações GPS, pois, permite um tratamento mais refinado quanto ao processamento de linhas de base, bem como, contempla a

possibilidade de se traçar estratégias, para a obtenção de resultados precisos e confiáveis. Deste modo, as estratégias adotadas no processamento das observações – descritas na seção 3.2 – juntamente com o tempo de execução dos rastreios, propiciaram coordenadas precisas (ver tabelas 3.6 e 3.7), que se confirma pelo desempenho satisfatório dos ajustamentos realizados (tabela 3.8). Além do teste Global, realizou-se – embora não se encontra neste trabalho – o teste Data Snoping para detectar erros embutidos nas observações, a um nível de significância de 0,83%. Entretanto, este teste não detectou nenhum erro significativo nas observações.

Finalmente, salienta-se que os resultados alcançados são satisfatórios, pois os desvios padrão das coordenadas estão ao nível do milímetro, haja visto o bom desempenho dos testes estatísticos realizados.

REFERÊNCIAS

- CHAVES, J. C. (2001): **Uso da Tecnologia GPS na Monitoração de Deformações: Sistemas, Etapas e Experimentos**. Tese de Doutorado. Curso de Transportes, São Carlos. São Carlos.
- COSTA, S. M. A. (1999): **Integração da Rede Geodésica Brasileira aos Sistemas de Referência Terrestres**. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 156p.
- DEPENTHAL, C.; SCHMITT, G. (2003): Monitoring of a Landslide in Vorarlberg/Austria. XI International FIG-Symposium on Deformation Measurements, Santorini, 25-28/05/2001. **Proceedings**. 7p.
- DREWES, H.; SANCHEZ, L. (2003): **Sistemas de Referencia Cinemáticos Modernos en Geodesia – Definición, Realización y Mantenimiento**. Apostila. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 95p.
- EVEN-TZUR, G. (2003): Monitoring Vertical Movements in Mount Carmel Region. XI International FIG-Symposium on Deformation Measurements, Santorini, 25-28/05/2001. **Proceedings**. 10p.
- FERREIRA, L. D. D.; GARNÉS, S. J. A. (2000): Análise da Deformação de Estruturas de Redes Geodésicas Horizontais. In: **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 4º COBRAC**. Florianópolis, Anais (CD).
- FORWARD, T.; STEWART, M. P.; TSAKIRI, M. (2003): GPS Data Stacking for Small Scale GPS Deformation Monitoring Applications. XI International FIG-Symposium on Deformation Measurements, Santorini, 25-28/05/2001. **Proceedings**. 7p.
- GEMAEL, C.; DOUBECK, A. (1982): **Auscultação Geodésica da Região da Barragem Bento Munhoz das Rocha**. Boletim da UFPR, n.º 28.
- GUPTA, H. K.; RASTOGI, B. K. (1976): **Dams and Earthquakes**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. (2001): **Global Positioning System: Theory and Practice**. 6th ed., Springer, Wien-New York.
- HUGENTOBLER, U.; SCHAER, S.; FRIDEZ, P.; (2001): **Bernese GPS Software – Version 4.2**. Astronomical Institute, University of Berne. Switzerland, 515 p.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **SIRGAS – Relatório Final**, IAG97. Rio de Janeiro, 1997.
- KONTNY, B.; STANISLAW, D.; CACON, S. (2003): Natural Tectonic Hazard for Water Dams System in the Sudetes and Fore-Sudetic Block. XI International FIG-Symposium on Deformation Measurements, Santorini, 25-28/05/2001. **Proceedings**. 8p.
- MONICO, J. F. G. (2000): **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS – descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: UNESP.
- NICKITOPOLOU, A.; PROTOPSALTI, K.; KONTOGIANNI, V.; TRIANTAFILLIDIS, P.; STIROS, S. (2003): Experimental Assessment of the accuracy of RTK – GPS for Monitoring Movements / Oscillations of Flexible Engineering Structures. XI International FIG-Symposium on Deformation Measurements, Santorini, 25-28/05/2001. **Proceedings**. 6p.
- SEEBER, G. (2003): **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. W. de Gruyter, Berlin-New York.
- TEAGUE, E. H.; HOW, J. P.; LAWSON, L. G.; PARKINSON, B. W. (1995): GPS as a Structural Deformation Sensor. In: AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, INC., Baltimore MD. **Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference**: AIAA, p. 1-9.
- TEIXEIRA, N. N. (2001): **Detecção e Análise de Deslocamento Vertical Utilizando o Sistema NAVSTAR-GPS**. Dissertação de Mestrado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 112 p.

(Recebido em outubro/04. Aceito em dezembro/04.)