

ESTIMATIVA DE DEFORMAÇÃO DA CROSTA TERRESTRE NA REGIÃO OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO COM BASE EM DADOS GNSS

FRANCIANE LIMA CALDAS¹
RODRIGO LUCAS PILLOTTO
JOÃO CARLOS CHAVES²
JOSÉ TADEU GARCIA TOMMASELLI³

Universidade Estadual Paulista - Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT
¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – PPGCC
²Departamento de Cartografia, Presidente Prudente – SP
³Departamento de Geografia, Presidente Prudente – SP

francianecaldas@hotmail.com
rlpillotto@yahoo.com.br
jcchaves@fct.unesp.br
tadeutommaselli@gmail.com

RESUMO - Este trabalho trata da estimativa da deformação de pontos sobre o território brasileiro utilizando estações da rede ativa GNSS de São Paulo e a técnica de posicionamento relativo estático. Para tanto, foram processados uma série temporal com dados dos anos de 2009 e 2010 coletados por dez estações GPS de monitoramento contínuo, distribuídas pela América Latina, utilizando os softwares GAMIT (GPS Analysis at MIT) e GLOBK (Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program). Os resultados indicam que ocorreu um deslocamento de cada estação durante o período, além de determinar um modelo matemático que permite a estimativa da deformação para pontos no oeste do Estado de São Paulo. Constatou-se um deslocamento na ordem do milímetro para as componentes E e N e na ordem do centímetros para a componente U.

Palavras chave: Rede Ativa GNSS-SP, Estimativa de Deformação, Geodinâmica, GAMIT, GLOBK.

ABSTRACT - This paper deals with the estimation of the deformation of points on the Brazilian territory using active network of GNSS stations in São Paulo and static relative positioning technique. To do so, were processed with a time series data for the years 2009 and 2010 collected for ten continuous GPS tracking stations distributed throughout Latin America, using the software GAMIT (GPS Analysis at MIT) and GLOBK (Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program .) The results indicate that there was a displacement of each season during the period, and determine a mathematical model that allows estimation of the deformation to points in western São Paulo State. It was noted a shift in the order of millimeters for components E and N and the order of centimeters for the component U.

Key words: Active Network GNSS-SP, Estimation of Deformation, Geodynamics, GAMIT, GLOBK.

1 INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento da superfície da terra vem aumentando significativamente nos últimos anos, em razão da preocupação e prevenção de desastre que podem ser causados por agentes naturais ou por de ações humanas através de grandes obras de engenharia.

A deformação na superfície da terra pode ocorrer por processos que agem a partir de segundos a milhões de anos. Esses processos ocorrem principalmente nos limites

das placas, onde a tensão é muito intensa, porém no interior das placas tectônicas os mesmos podem ocorrer em decorrência de carga hidrológica, falhas geológicas, reservatórios de UHE (Usina Hidrelétrica) entre outros.

Acidentes causam perdas humanas e materiais, além de impactos à sociedade, que ao mesmo tempo em que lamenta tais acontecimentos, pede por respostas e espera que providências sejam tomadas para evitar novas tragédias.

Cada vez mais, estudos objetivando o monitoramento de pontos na superfície da Terra com o apoio de técnicas GNSS (Global Navigation Satellite System) têm ajudado a comunidade científica na prevenção de catástrofes naturais. Trabalhos como o apresentado por Featherstone et al. (2003), que monitorou a deformação da Austrália Ocidental com base em observações GPS (Global Positioning System); a pesquisa de Soto (2006) que monitora as deformações de pontos da rede SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), situados em áreas com atividade tectônica, são exemplos relacionados com este assunto.

Entretanto, o exemplo que melhor ilustra a importância do monitoramento de estruturas foi o artigo apresentado por Ruegg et al. (2009). Este trabalho analisou o acúmulo de tensão intersísmica com observações GPS na região de Constitución e Concepción no Chile. Decorrido um ano da publicação do artigo, ocorreu um forte tremor na região de estudo, incidentes como este já eram previstos por Ruegg et al. (2009): "... a parte sul de Concepción e Constitución acumulou um déficit de deslizamento que é grande o suficiente para produzir um terremoto muito grande com magnitude de aproximadamente 8,0 a 8,5 graus na Escala Richter".

É de conhecimento geral que o território brasileiro apresenta baixa frequência de eventos sísmicos de grande magnitude, em virtude de sua posição no interior da placa litosférica Sul-Americana, todavia, este fato não significa que o país esteja isento a riscos dessa natureza. Para esse trabalho, analisa-se o comportamento de estações que pertencem à rede GNSS, constituindo um conjunto de estações na região oeste do estado de São Paulo. Tais estações disponibilizam dados GNSS possibilitando, assim, o processamento de suas posições tridimensionais com boa precisão, que permitem a análise geométrica de deformação da rede de estudo. A análise temporal do comportamento dessas estações pode ser utilizada como fonte de informações em estudos de deformações da crosta.

2 DEFORMAÇÃO DA SUPERFÍCIE TERRESTRE

Segundo Santos (1999), deformação refere-se à "ação ou resultado de deformar", ou seja, "modificação à forma". Para a Geodésia, deformação refere-se às modificações que um corpo deformável, natural ou artificial, sofre com relação a sua forma, dimensão e posição (TEIXEIRA, 2005). Corpo pode ser definido como uma estrutura capaz de receber e transmitir forças, e o seu comportamento estando sujeito às forças externas. O conceito de corpo se estende a várias partes do planeta Terra, tais como placas tectônicas e regiões sujeitas a vulcanismo, ao soergimento pós-glacial, e a subsidência (SANTOS, 1999). Neste trabalho, as estações que pertencem a Rede GNSS/SP é a estrutura objeto de estudo.

A Terra é um corpo visco-elástico e sua crosta está sujeita a deformações que são causadas por uma série de fenômenos físicos (MOREIRA, 2010). Os movimentos da crosta causam deslocamento de suas estações, tanto na

direção vertical quanto horizontal, sendo as variações horizontais mais significativas, e deformação na estrutura composta por esse conjunto de estações.

Os parâmetros de deformação são estimados quando se considera que a estrutura investigada sofre um processo de deformação infinitesimal e homogêneo. Tal consideração repousa na teoria da elasticidade, especificamente, na hipótese de campos elásticos e homogêneos (LOVE, 1944). De acordo com Crespi et al. (2000) tal hipótese é muito importante em aplicações geofísicas.

A deformação de um corpo é dita homogênea quando deslocamentos sofridos pela partícula são expressos em funções lineares de suas coordenadas. As principais características analisadas são:

- linhas retas transformam-se em linhas retas;
- linhas paralelas, após a deformação, continuam paralelas.
- existe um conjunto de três linhas ortogonais antes da deformação, que após a deformação permanecem ortogonais, apesar de alterarem suas direções (TEIXEIRA, 2005).

Tais características implicam que a deformação se comporta da mesma maneira em todos os pontos segundo Thapa (1980), sendo também reversível.

A deformação infinitesimal relaciona as mudanças instantâneas do corpo à sua configuração instantânea (THAPA, 1980). No caso da teoria de deformação infinitesimal, esta pode ser aplicada sem restrições nos estudos de deformações em estruturas geodésicas, pelo fato de que os deslocamentos dos pontos desta estrutura são muito pequenos em relação às dimensões da própria estrutura.

Podemos considerar como um corpo deformável, qualquer corpo que num dado momento apresenta a configuração geométrica conforme a Figura 1.a, com seus pontos de coordenadas definidos em um sistema de referência Oxy. O mesmo corpo, após sofrer um processo de deformação homogênea e infinitesimal, tem os pontos de coordenadas ocupando uma nova posição, como na Figura 1.b.

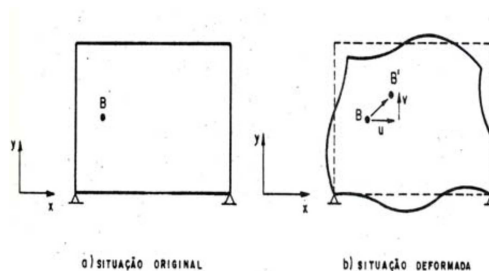


Figura 1 – Estado de Deformação. Fonte: Adaptado de Laier e Barreiro, (1983).

3 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE DEFORMAÇÃO

Para estimar os parâmetros de deformação com base no deslocamento, deve-se atender a duas hipóteses, segundo Santos (1999): admitir que o processo de deformação sofrido pela estrutura geodésica possa ser tratado de acordo com as teorias de deformação homogênea e infinitesimal; a ordem de grandeza dos deslocamentos relativos de dois vértices vizinhos é pequena, em comparação com a distância que os separa.

A determinação dos parâmetros de deformação (\hat{c}) é obtida, segundo Chrzanowski et al. (1986), por:

$$\hat{c} = (B^T P_d B)^{-1} B^T P_d \quad (1)$$

onde, d é o vetor deslocamento, P_d sua matriz peso e B a matriz das derivadas parciais dos polinômios com relação às posições dos pontos.

O modelo matemático é estimado em função de um polinômio, de maneira que seus coeficientes representem os parâmetros de deformação da estrutura investigada, neste trabalho, a rede GNSS/SP na região Oeste do Estado de São Paulo, conforme Chaves (2001):

$$dx_i = a_1 x_i + a_2 y_i \quad (2)$$

$$dy_i = b_1 x_i + b_2 y_i \quad (3)$$

Estas equações relacionam os deslocamentos com as deformações, e, portanto, são denominadas de relações deslocamento-deformação. As componentes de deformação são representadas pelos coeficientes destes polinômios.

4 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

No desenvolvimento deste trabalho utilizaram-se dados referentes às estações da Rede ativa GNSS de São Paulo (GNSS-SP) do ano 2009 e 2010, considerando as seguintes estações: Ilha Solteira (ILHA), Ourinhos (OURI) e de Rosana (ROSA). Para a definição do referencial da rede utilizada, utilizaram-se seis estações pertencentes ao IGS distribuídas no continente americano e uma estação presente na Antártida: Brasília (BRAZ), Cachoeira Paulista (CHPI), Bermuda (BRMU), Eusébio (BRFT), La Prata (LPGS), Fort Davis (MDO1), Salta (UNSA) e Santiago de Cuba (SCUB). Os dados dessas estações foram transferidos do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e do CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System).

A seguir, apresentam-se a localização das estações IGS da Rede SIRGAS, Figura 2, utilizadas como referência nos processamentos e a localização das estações da Rede GNSS-SP, Figura 3.



Figura 2 – Estações IGS utilizadas como referência. Fonte: Os Autores.

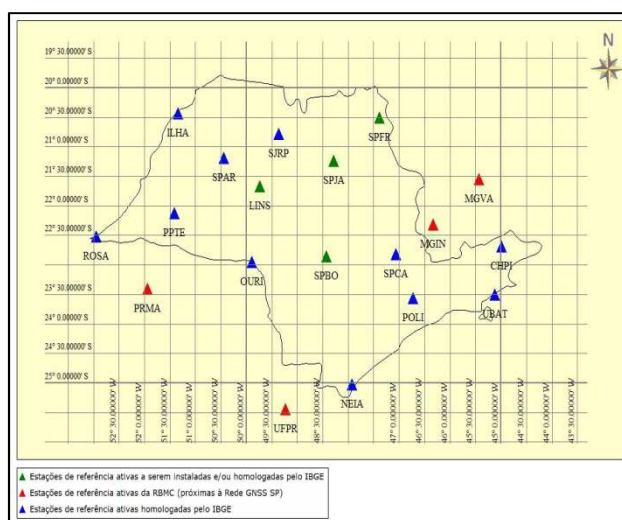


Figura 3 - Rede GNSS São Paulo. Fonte: disponível em: <http://www.fct.unesp.br/#1142,2089>, acessado em 20/05/2012.

Para o processamento dos dados, utilizou-se o software GPS Analysis at MIT (GAMIT), desenvolvido pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), no Departamento da Terra, Atmosfera e Ciências Planetárias, processando-se de maneira remota via servidor instalado na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)/UNESP. Para o ajustamento e definição do referencial das estações foi utilizado o software Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program (GLOBK) também desenvolvido pelo MIT e acessado de forma remota, via servidor.

A estratégia de processamento foi a mesma adotada pelos Centros de Processamento do SIRGAS, disponível em sua página, como p.ex.: taxa de amostragem, máscara de elevação, órbitas/EOP, estratégia de base, peso das observações, modelo troposférico a priori, atraso zenital, ambiguidades, modelo carga oceânica, variação do centro de fase, coordenadas e velocidades, solução diária e solução semanal.

Devido o grande volume de dados utilizados no trabalho, elaborou-se um processo de automatização de coleta de dados através de scripts com uma rotina de

comandos. A rotina permite realizar o download de todos os arquivos de observação (RINEX) das estações, das efemérides transmitidas e das órbitas precisas dos satélites e, posteriormente, os dados são processados.

4.1 Estimativa dos parâmetros de deformação

Como o trabalho em questão atende as hipóteses descritas anteriormente, elaborou-se uma rotina de cálculos com auxílio do software MatLab R12, para calcular os valores dos parâmetros de deformação em função do deslocamento, utilizando pontos vizinhos que seriam como referência.

Os pontos vizinhos considerados são duas estações IGS localizadas no território brasileiro e que também foram utilizadas para a realização do sistema de referência do processamento, as estações BRAZ e CHPI.

A rotina de cálculo desenvolvida estima os parâmetros de deformação de uma estação de estudo (ILHA, OURI e ROSA) em duas épocas, assumindo que as estações de referência estejam estáveis entre as épocas.

O modelo também calcula os elementos da elipse dos erros da estação, estimando seus valores de máxima e mínima deformação no período.

4.2 Estimativa da variação angular e linear das estações.

Realizou-se uma estimativa da variação linear e angular entre as estações de estudo. Para as variações lineares foram calculadas as distâncias entre as estações Ilha Solteira e Ourinhos, Ourinhos e Rosana e entre Rosana e Ilha Solteira. No caso das variações angulares calculou-se a orientação (azimute) entre as estações.

Para o caso linear e angular foram estimados valores para um período de oito épocas, avaliando as coordenadas com um espaçamento de 50 dias.

Para o cálculo da variação angular utilizou-se várias ferramentas desenvolvidas pelo NGS (Nacional Geodetic Survey) e disponível em: <http://www.ngs.noaa.gov/TOOLS/>. Uma delas foi XYZ Coordinate Conversion, usada para converter as coordenadas do sistema cartesiano geocêntrico para coordenadas geográficas. A outra ferramenta utilizada foi a componente Inverse do grupo de ferramentas Inverse/Forward/Invers3D/Forwrd3D, essa ferramenta calcula os azimutes geodésicos entre cada estação além de calcular a distância elipsoidal entre as estações.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

A tabela (1) apresenta os valores dos parâmetros obtidos após o ajustamento para cada estação no Sistema Geodésico Local, sendo os valores analisados em função dos componentes E (East), N (North) e U (Up), com respectivos desvios-padrão.

Tabela 1 – Parâmetros ajustados de cada estação no sistema local e seus respectivos desvios padrão.

	E (m)	N (m)	U (m)	δE (m)	δN (m)	δU (m)
BRAZ	-1775264,698	33407899,950	1106,033	0,008	0,012	0,019
BRFT	-431635,328	35715613,720	21,735	0,016	0,035	0,070
BRMU	3603456,329	27765156,790	2765156,790	0,059	0,063	0,092
CHPI	-2525521,433	32354106,050	617,434	0,015	0,005	0,024
LPGS	-3885801,061	27575871,780	29,850	0,023	0,037	0,050
MDOI	3415338,913	24507104,690	2004,413	0,117	0,131	0,175
PPTE	-2462376,401	31823995,260	431,035	0,004	0,005	0,018
SCUB	2227732,727	29730501,720	20,904	0,050	0,068	0,110
UNSA	-2752647,817	29787229,740	1257,767	0,030	0,010	0,067
ILHA	-2274010,473	32198467,490	375,044	0,008	0,013	0,021
OURI	-2554690,225	31788246,400	444,853	0,011	0,006	0,024
ROSA	-2507282,574	31573293,070	299,727	0,004	0,007	0,014

No cálculo dos parâmetros de deformação e dos elementos da elipse de deformação, utilizaram-se as coordenadas no sistema geodésico local. Como época inicial do cálculo, adotou-se o dia 182 do ano de 2009 e para a segunda época o dia 212 do ano de 2010. Os valores obtidos podem ser vistos na tabela (2):

Tabela 2 - Valores dos parâmetros de deformação e dos elementos da elipse dos erros.

Parâmetros	ILHA (ppb)	OURI (ppb)	ROSA (ppb)
a1	41,5	8,8	11,1
a2	-29,5	-6,3	-7,9
b1	207,8	201,9	114,3
b2	-147,9	-143,7	-81,3
λ_{\min}	-281,5	-283,2	-158,4
λ_{\max}	175,1	148,4	88,2
θ	-77° 31' 50"	-87° 40' 44"	-84° 06' 01"

Observa-se, na tabela (2), que os valores dos parâmetros de deformação estão em partes por bilhão (ppb). Para os parâmetros lineares, a1 e b2, a estação ILHA teve maior variação, enquanto para os parâmetros angulares, a2 e b1, a estação OURI apresentou maiores valores. A estação OURI também teve os maiores valores da máxima deformação, λ_{\max} , e da mínima deformação, λ_{\min} . Quanto à orientação das elipses, o valor encontrado na estação de ILHA difere das demais estações.

No cálculo da variação linear entre as estações, foram utilizadas as coordenadas diárias das estações. Em um total de oito épocas, com o espaçamento de 50 dias entre cada época, foram calculadas as distâncias lineares entre as estações da rede de estudo. A tabela (3) mostra as

distâncias entre as estações para as diferentes épocas, assim como sua variação média e seus desvios-padrão.

Tabela 3 - Valores Lineares entre as estações em metros.

Dia / Ano	ILHA - OURI	OURI - ROSA	ROSA - ILHA
200 / 09	316852,285	317522,769	285693,936
250 / 09	316852,276	317522,769	285693,934
300 / 09	316852,291	317522,767	285693,980
350 / 09	316852,229	317522,755	285693,907
050 / 10	316852,277	317522,762	285693,936
100 / 10	316852,281	317522,769	285693,935
150 / 10		317522,735	
200 / 10		317522,818	
Média	316852,273	317522,768	285693,939
D.P	0,022	0,023	0,023

Como é visto na tabela (3), a variação linear entre as estações não teve grandes valores, e as estações tiveram variações praticamente similares na casa do milímetro. A estação ILHA, mesmo com duas épocas a menos que as demais é a que apresenta um desvio padrão satisfatório comparado com as demais.

Para o cálculo da variação angular entre as estações, foram utilizadas as coordenadas diárias das estações. De um total de seis épocas, com o espaçamento de 50 dias entre cada época, foram calculados os azimutes geodésicos entre as estações, ILHA e OURI, OURI e ROSA e, por fim, ROSA e ILHA.

A tabela (4) mostra a diferença entre os azimutes calculados para cada estação em cada época.

Tabela 4 – Azimute geodésico entre as estações em diferentes épocas.

	ILHA OURI	OURI ROSA	ROSA ILHA
200 / 09	152° 2' 5,3307"	277° 56' 53,5925"	35° 59' 50,2449"
250 / 09	152 2 5,3364	277 56 54,6893	35 59 50,2537
300 / 09	152 2 5,4552	277 56 54,8987	35 59 50,2557
350 / 09	152 2 5,3348	277 56 53,3683	35 59 50,1246
050 / 10	152 2 5,3375	277 56 53,3667	35 59 50,2484
100 / 10	152 2 6,8219	277 56 53,3657	35 59 50,2478

Assim, como no caso linear, considerou-se a primeira época como referência e, em seguida, realiza-se

a diferença entre os valores obtidos entre as épocas, como mostrado na tabela (5).

Tabela 5 – Diferenças entre os azimutes geodésicos encontrados entre cada época em relação à primeira época.

	ILHA OURI	OURI ROSA	ROSA ILHA
200 / 09	0	0	0
250 / 09	0,0057"	1,6908"	0,0088"
300 / 09	0,1245"	1,3062"	0,0108"
350 / 09	0,0041"	0,2242"	0,1203"
050 / 10	0,0068"	0,2258"	0,0035"
100 / 10	1,4912"	0,2268"	0,0029"

Como é visto nas tabelas (4) e (5), as variações angulares entre as estações não tiveram grandes valores, estando sempre com uma variação máxima de 1" de arco. Ao contrario da variação linear, as estações OURI e ROSA tiveram os valores mais altos da variação angular.

6 CONCLUSÕES

Com a quantidade considerável de dados utilizados neste trabalho, obteve-se uma ideia do comportamento das coordenadas dos pontos localizados no Oeste de São Paulo. Esse comportamento é observado com base nos parâmetros ajustados de cada estação, cada parâmetro foi estimado com base em um ajustamento livre. Assim, além dos parâmetros estimados, a MVC dos mesmos também foi obtida, o que permite concluir que os mesmos possuem baixa incerteza, tendo em vista que os desvios-padrão apresentados possuem valores pequenos.

Analisando as discrepâncias e os valores obtidos dos parâmetros de deformação, os resultados se mostram coerentes, pois as estações estão em uma região de baixa atividade sísmica.

Ao utilizar a técnica GNSS, esta mostrou grande potencialidade em relação à aplicação do trabalho, devido à qualidade dos resultados, sendo possível determinar parâmetros de pequena magnitude e com alta confiabilidade.

Foi constatado que ocorreu um deslocamento entre o início e o término da época de estudo para as estações da rede de São Paulo, entretanto, a variação esteve abaixo da precisão do método utilizado, assim, não é possível afirmar que ocorreu de fato uma deformação da rede.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, campus de Presidente Prudente, em especial ao Departamento de Cartografia e ao Laboratório de Geodésia Espacial.

REFERÊNCIAS

CHAVES, J. C. **Uso da tecnologia GPS na monitoração de deformação: sistemas, etapas e experimentos.** Tese de doutorado junto a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), defendida em 23/03/2001.

CHRZANOWSKI, A.; CHEN, Y.; SECORD, J.M. **Geometrical analysis of deformation surveys.** In: Proc. Deformation Meas. Workshop, MIT Cambridge - Mass., p. 170-206. 1986.

CRESPI, M; PIETRANTONIO, G.; RIGUZZI, F. **Strain Tensor Estimation by GPS Observations: software and applications.** Bolletino di Geodesia e Scienze, Affini, n. 3. 2000.

FEATHERSTONE, W. E.; PENNA, N. T.; LEONARD, M.; CLARK, D.; DAWSON, J.; DENTITH, M. C.; DARBY, D.; MCCARTHY, D. **GPS - geodetic deformation monitoring of the south-west seismic zone of Western Australia: review, description of methodology and results from epoch-one.** Journal of the Royal Society of Western Australia. 2003.

HERRING, T. A.; KING, R. W.; MCCLUSKY, S.C. **Introduction to GAMIT/GLOBK.** Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology. 2009.

LAIER, J. E.; BARREIRO, J. C.. **Complementos de Resistências dos Materiais.** Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, SP, 207 p. 1983.

LOVE, A. H. E. **A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity.** New York: ed. Dover. 1994.

MOREIRA, D. M.. **Rede de Referência Altimétrica para Avaliação da Altimetria por Satélites e Estudos Hidrológicos na Região Amazônica,** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2010.

RUEGG, J. C.; RUDLOFF, A.; VIGNY, C.; MADARIAGA, R.; CHABALIER, J. B.; CAMPOS, J.; KAUSEL, E.; BARRIENTOS, S.; DIMITROV, D. **Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile.** Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2009.

SANTOS, M. C. **Estabilidade das Estruturas Geodésicas.** Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 1999, 74 p.

SILVA, M. C. D. **Aplicação da mecânica dos corpos deformáveis à análise de consistência de observação em redes geodésicas horizontais.** Dissertação de

mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 1986.

SOTO, J. C. B. **Monitoramento das deformações da rede de referência do Sirgas em área com atividade tectônica.** Dissertação de Doutorado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

TEIXEIRA, N. N. **Análise geodésica de deformações da crosta em regiões de grandes barragens a partir de deslocamentos tridimensionais obtidos pelo sistema de posicionamento global.** Dissertação de Mestrado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2005.

THAPA, K. **Strain as a diagnostic tool to identify inconsistent observations and constraints in horizontal geodetic networks.** Department of Surveying Engineering Technical Report No. 68, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada, 160 p. 1980.