



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

FRANCIANE LIMA CALDAS

**ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DA REDE GEODÉSICA GNSS/SP COM BASE  
NA TEORIA DA ELASTICIDADE**

**PRESIDENTE PRUDENTE**

**2014**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

FRANCIANE LIMA CALDAS

**ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DA REDE GEODÉSICA GNSS/SP COM BASE  
NA TEORIA DA ELASTICIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, campus de Presidente Prudente, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

**PRESIDENTE PRUDENTE**

**2014**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

FRANCIANE LIMA CALDAS

**ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DE REDE GEODÉSICA GNSS/SP COM BASE  
NA TEORIA DA ELASTICIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, campus de Presidente Prudente, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: João Carlos Chaves

**PRESIDENTE PRUDENTE**

**2014**

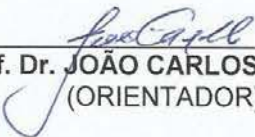
## FICHA CATALOGRÁFICA


Cr15a Caldas, Franciane L.  
Análise de deformação da rede GNSS/SP com base na teoria da elasticidade / Franciane Lima Caldas. - Presidente Prudente : [s.n], 2014  
94 f.

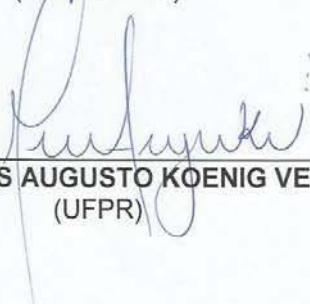
Orientador: João Carlos Chaves  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Inclui bibliografia

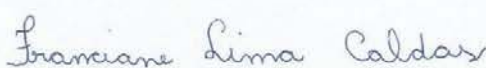
1. Rede GNSS/SP. 2. Deformação. 3. Teoria da Elasticidade. I. Chaves, João Carlos. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. JOÃO CARLOS CHAVES**  
(ORIENTADOR)

  
\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES**  
(UNESP/FCT)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA**  
(UFPR)

  
\_\_\_\_\_  
**FRACIANE LIMA CALDAS**

Presidente Prudente (SP), 28 de fevereiro de 2014.

Resultado: APROVADO

*Dedico essa dissertação aos meus queridos pais José Cleris e Fátima e ao meu irmão Fábio que me amam incondicionalmente.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a Deus, por me dar a vida e força espiritual para enfrentar os caminhos difíceis. Por me capacitar para a realização de mais um grande objetivo.

À minha família, pelo amor que me dedicam, pela união e colaborar direta e indiretamente na realização dos meus sonhos.

Aos meus pais por cuidarem tão bem de mim, pelo amor incondicional e entenderem os meus momentos de ausência, estresses e desespero.

À minha mãe Fátima, por entender todos os momentos que eu estava passando, por consolar os meus choros e por todas as orações a mim concedidas.

Ao meu pai José Cleris, que com sua exigência despercebida me fez ir além do que eu achava ser possível.

Ao meu irmão Fábio, por me amar e me dedicar sua verdadeira amizade. Por torcer e acreditar em mim nessa difícil caminhada.

Ao meu namorado Pedro, pelo seu carinho e amizade, paciência e incondicional apoio que sempre demonstrou. Muito obrigado pelas conversas e palavras de coragem nos momentos ruins, bem como a força transmitida.

Ao meu orientador João Carlos Chaves, por toda dedicação, compreensão, confiança, paciência, profissionalismo, sabedoria, carinho, amizade e apoio na condução desta pesquisa.

A todos os meus amigos que distantes ou não me davam apoio e palavras de carinho e conforto.

À tia Lurdes e tio Jorge pelas constantes orações e aguentar minhas crises e lamentações.

À prima Larissa, por realmente me entender, transmitir pensamentos positivos e acreditar em mim.

Ao colega do grupo de estudo Fernando, por colaborar com os processamentos dos dados GNSS.

A UNESP campus de Presidente Prudente por ser a extensão de minha casa nesse período.

Obrigada a todos que contribuíram para a concretização deste trabalho.



## RESUMO

Nos conceitos de teoria da elasticidade, um corpo quando submetido a ação de forças externas ou de tensões, sofre alterações na sua configuração original. A mudança de sua configuração é denominada deformação. Deformação refere-se às modificações que um corpo deformável sofre com relação a sua forma e dimensão, o que implica também na alteração de suas posições relativas (LOVE, 1994). Neste estudo, foram investigadas as deformações que ocorrem na superfície terrestre, analisando dados oriundos das estações da Rede GNSS/SP. Foram utilizadas quatro estações IGS para servir de referência nos cálculos da deformação. Os eventuais deslocamentos e deformações detectados na estrutura podem ser resultados de análises e interpretações equivocadas, sendo que os pontos de referência devem ser testados se permanecem estáveis. Foi aplicado o Teste de Congruência Global nas estações da Rede GNSS/SP como também das estações de referência para análise dos deslocamentos e estabilidade da rede. Após a verificação da estabilidade dos pontos de referência é então calculado os parâmetros de deformação. Dessa maneira, utilizou-se uma série temporal com os dados dos anos de 2010, 2011 e 2012 coletados para 10 estações de monitoramento contínuo GNSS (seis estações da estrutura investigada e quatro estações utilizadas como referência) utilizando os softwares GAMIT (*GPS Analysis at MIT*) e GLOBK (*Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program*). Os resultados indicam que ocorreram deslocamentos na estrutura investigada durante o período analisado e que as estações utilizadas no processamento e no cálculo das deformações como referência permaneceram estáveis. Com base nos resultados obtidos, foi determinado um modelo matemático que permite a estimativa da deformação para os pontos da Rede GNSS/SP.

Palavras-Chave: Rede GNSS/SP, Estimativa de deformação, Teste de congruência global, Redes geodésicas, Geodinâmica.

## ABSTRACT

Basing on concepts of elasticity theory, a body under action of external forces or tensions suffers alteration on its original conformation. This change in the body conformation is called deformation. The deformation refers to the several modifications that a body can suffer regarding its shape, dimensions and consequently in its relative position. (LOVE 1994). The purpose of this study was to investigate deformations occurring in the Earth's surface through the analysis of data from GNSS/SP Network stations. Four IGS stations were used as reference for the calculation of deformations. Any occasional displacements and deformations detected in the Earth's structure may be the result of bias on analysis and interpretations, once the references point shall be tested whether are stable or not. To asses the displacement and stability of network, were applied the Global Congruency test on the GNSS/SP network stations even as on the stations of reference. Once it was verified the stability of reference points, then were calculated the parameters of deformation. Thereby, a temporal series analysis containing data of years 2010, 2011 and 2012 collected for 10 GNSS continuously monitored stations (six from the investigated structure and four stations used as reference) were processed accordingly, using GAMIT (GPS Analysis at MIT), and GLOBK (Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program) software. The results show that occur displacement on the structure object of this present study, during the period assessed, and the stations used as reference in processing and calculating deformations, remained stable. As a result a mathematical model was determined, which allows estimating the deformations regarding to GNSS SP Network points.

Keywords: GNSS Network SP, Estimation the deformation, Global Congruency Test, Geodetic Networks, Geodynamics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas composicionais e reológicas da Terra.....	25
Figura 2 - Divisão das placas tectônicas .....	26
Figura 3 - Limite transformante, divergente e conservante. ....	27
Figura 4- Rede geodésica absoluta.....	36
Figura 5- Rede geodésica relativa.....	37
Figura 6 – Fluxograma preliminar da metodologia .....	51
Figura 7 - Rede GNSS São Paulo.....	52
Figura 8 - Deslocamento na estação de SJRP.....	71
Figura 9 - Deslocamento na estação de SPAR. ....	72
Figura 10 - Deslocamento na estação de ROSA.....	73
Figura 11 -- Deslocamento na estação de ILHA.....	74
Figura 12 - Deslocamento na estação de OURI.....	75
Figura 13 - Deslocamento na estação de PPTE. ....	76
Figura 14 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1 <sup>a</sup> . e 2 <sup>a</sup> . ....	77
Figura 15 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1 <sup>a</sup> . e 3 <sup>a</sup> . ....	78
Figura 16 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1 <sup>a</sup> . e 4 <sup>a</sup> . ....	79
Figura 17 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1 <sup>a</sup> . e 5 <sup>a</sup> . ....	80
Figura 18 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1 <sup>a</sup> . e 6 <sup>a</sup> . ....	81
Figura 19 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1 <sup>a</sup> . e 7 <sup>a</sup> . ....	82
Figura 20 - Resultante das estações da Rede GNSS/SP. ....	83

Figura 21 - Principais falhas geológicas no território brasileiro.. ..... 93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Erros envolvidos nas observações GPS .....	49
Tabela 2 - Épocas para análises de deformação .....	60
Tabela 3 - Esquema da combinação das campanhas para aplicação do TCG	61
Tabela 4 - SJRP .....	66
Tabela 5 - SPAR .....	67
Tabela 6 - ROSA .....	67
Tabela 7 - ILHA .....	67
Tabela 8 - OURI .....	68
Tabela 9 - PPTE .....	68
Tabela 10 - BRAZ .....	68
Tabela 11 - CHPI .....	69
Tabela 12 - SAVO .....	69
Tabela 13 - UFPR .....	69
Tabela 14 – Deslocamento na estação de SJRP .....	71
Tabela 15 - Deslocamento na estação de SPAR .....	72
Tabela 16 - Deslocamento na estação de ROSA .....	73
Tabela 17 - Deslocamento na estação de ILHA .....	74
Tabela 18 - Deslocamento na estação de OURI .....	75
Tabela 19 - Deslocamento na estação de PPTE .....	76
Tabela 20 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 2 .....	77

Tabela 21 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 3.....	78
Tabela 22 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 4.....	79
Tabela 23 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 5.....	80
Tabela 24 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 6.....	81
Tabela 25 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 7.....	82
Tabela 26 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 2.....	85
Tabela 27 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 3.....	86
Tabela 28 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 4.....	87
Tabela 29 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 5.....	88
Tabela 30 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 6.....	89
Tabela 31 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1 e 7.....	90
Tabela 32 - Parâmetros de deformação estação SJRP .....	91
Tabela 33 - Parâmetros de deformação estação SPAR.....	91
Tabela 34 - Parâmetros de deformação estação ROSA .....	91
Tabela 35 - Parâmetros de deformação estação ILHA .....	91
Tabela 36 - Parâmetros de deformação estação OURI .....	92
Tabela 37 - Parâmetros de deformação estação PPTE .....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BRAZ	Brasília
CDDIS	<i>Crustal Dynamics Data Information System, GSFC, NASA, USA</i>
CHPI	Cachoeira Paulista
CODE	<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FIG	<i>International Federation of Surveyors</i>
GAMIT	<i>GPS Analysis at MIT</i>
GLOBK	<i>Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program</i>
GMF	<i>Global Mapping Function</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	<i>International GPS Service</i>
ILHA	Ilha Solteira
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MVC	Matriz Variância Covariância
OURI	Ourinhos
PPGCC	Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográfica
PPTTE	Presidente Prudente

RINEX	<i>Receiver Independent EXchange Format</i>
RMS	<i>Root - mean square</i>
ROSA	Rosana
SAVO	Salvador
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SJRP	São José do Rio Preto
SPAR	Araçatuba
SSH	<i>Secure Shell for Workstation</i>
TCG	Teste de Congruência Global
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UHE	Usinas Hidrelétrica
UTC	Tempo Universal Coordenado



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	Objetivos .....	20
1.2	Justificativa .....	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>23</b>
2.1	Dinâmica terrestre .....	23
	2.1.1 Movimento de Placas Tectônicas .....	26
2.2	Teoria da elasticidade.....	28
	2.2.1 Deformação .....	30
	2.2.2 Modelo matemático de deformação.....	33
2.3	Monitoramento de estruturas .....	35
	2.3.1 Redes de monitoração geodésica .....	35
2.4	Ajustamento de observações.....	37
2.5	Análise de tendência de deslocamento das estações da rede analisada.....	41
	2.5.1 Teste de congruência global.....	43
2.6	GNSS no monitoramento de estruturas .....	45
2.7	Observáveis GNSS.....	46
	2.7.1 As observáveis GNSS: características .....	47
	2.7.2 Erros associados ao posicionamento GNSS .....	48
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
3.1	Área de estudo: Rede GNSS São Paulo .....	51
3.2	Processamento dos dados GNSS .....	53
	3.2.1 Preparação dos arquivos globais e específicos das estações e do experimento .....	55
	3.2.2 Coleta de dados e processamento de forma automática.....	56
	3.2.3 Estimação de parâmetros pelo software GAMIT .....	58

3.2.4	Análise das soluções diárias .....	59
3.2.5	Combinação das soluções.....	59
3.3	Teste de Congruência Global .....	61
3.4	Estimativa dos parâmetros de deformação.....	62
3.5	Determinação do modelo de deformação .....	64
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTOS E ANÁLISES .....</b>	<b>66</b>
4.1	Soluções geodésicas para o experimento .....	66
4.2	Cálculo dos deslocamentos das coordenadas das investigadas .....	70
4.3	Análise de congruência das estações pesquisadas .....	84
4.4	Estimativas dos parâmetros e do modelo de deformação .....	90
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>104</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A teoria da tectônica das placas prevê que as principais deformações da superfície da Terra são as que ocorrem ao longo dos limites das grandes placas litosféricas (interplacas), que podem ser convergentes, divergentes ou transformantes. No entanto, na região interior dessas placas também ocorrem deformações (intraplacas).

De acordo com Biessy et al. (2011), a superfície da Terra manifesta-se por processos de deformações que são estudados por métodos geodésicos. Essas deformações são provenientes de processos geológicos que agem a partir de alguns segundos a milhões de anos e em áreas que variam de metros a centenas de quilômetros. São estudados principalmente nos limites das placas, onde a tensão é muito intensa e onde os eventos como terremotos podem ter importantes impactos sociais e econômicos.

Porém, estudos que tratam da ocorrência de eventos sísmicos no interior das placas litosféricas, mostram que as tensões se acumulam nas falhas geológicas. Apesar de pouco frequente, esses eventos referem-se a uma desconhecida deformação, o que representa dificuldades significativas para compreender os riscos associados (CALAIS et al., 2006).

Diversos processos podem contribuir com a ocorrência de deformação no interior das placas tectônicas, entre eles a exploração de águas de aquíferos naturais (BIESSY et al., 2011). É crescente a preocupação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), principalmente no que diz respeito à proteção e uso sustentável da água. No entanto, atribuem um papel pouco expressivo sobre o monitoramento da superfície acima dos aquíferos, sujeita a subsidência devido à extração de água. Em alguns casos, a extração de água subterrânea através de poços pode provocar subsidência de terrenos nas imediações, levando a rachaduras em construções e afundamento do terreno (CABRAL et al., 2006).

Outro fator que também pode contribuir para a subsidência da superfície da Terra é o acúmulo de grande carga hidrológica dos reservatórios das barragens de Usinas Hidrelétricas (UHE). A formação de grandes reservatórios de (UHE) pode induzir a deformação na crosta terrestre, e ocasionar sismos em regiões antes assísmicas. Este fenômeno é conhecido como Sismicidade Induzida por Reservatórios (GUPTA e RASTOGI<sup>1</sup>, 1976; apud TEIXEIRA, 2005).

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram analisados os dados do Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*) do Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*), coletados e processados para as estações da Rede GNSS/SP: Iha Solteira (ILHA), São José do Rio Preto (SJRP), Rosana (ROSA), Ourinhos (OURI), Araçatuba (SPAR) e Presidente Prudente (PPTTE); onde, posteriormente, foram aplicados os fundamentos da teoria da elasticidade. A análise dessa Rede tem o objetivo de verificar a existência de processos de deformação na região oeste do Estado de São Paulo, pois essa região possui grande potencial hídrico, com três grandes reservatórios de UHE, e a presença do aquífero natural Bauru.

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é analisar a deformação das estações pertencentes à Rede GNSS/SP, utilizando os conceitos da teoria da elasticidade.

Como objetivos específicos:

- Verificar a estabilidade da estrutura geodésica da rede investigada;

---

<sup>1</sup> GUPTA, H. K.; RASTOGI, B. K. **Dams and Earthquakes**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1976.

- Estimar os parâmetros de deformação das estações da Rede GNSS/SP.

## 1.2 Justificativa

O interesse e motivação pelo tema surgiram no desenvolvimento do Trabalho de Graduação da mestranda, no ano de 2010 que teve como título “Estimativa de deformação da crosta terrestre na região oeste do Estado de São Paulo com base em dados GNSS”. Nesta pesquisa, analisa-se que esta região possui deformações do tipo intraplaca, com base nos experimentos realizados, requerendo um estudo mais aprofundado.

Além da motivação pessoal, esta dissertação se justifica também pela sua relevância acadêmica, pois não foram identificadas publicações de trabalhos acadêmicos referentes à região de estudo (teses, dissertações, monografias, e outros). Assim, se torna interessante que o assunto seja estudado ou explorado em Programa de Pós-Graduação para buscar soluções de bases científicas e tecnológicas associadas com a determinação do modelo de deformação da Rede GNSS/SP.

Dentro da relevância científica, tem-se que, em regiões intraplacas, a deformação da superfície terrestre ocorre com menor frequência e com baixas amplitudes, sem qualquer processo dominante. Diversos fatores podem agir nas suas características temporais e espaciais. No entanto, a deformação acumulativa em um período de vários anos pode se tornar significativa.

Além do mais, a rede investigada (conjunto de estações localizadas na Rede GNSS/SP) não possui um modelo de deformação, o qual é relevante para os estudos relacionados com as transformações do Sistema Terrestre, bem como para o entendimento do processo de deformação.

Assim, esta pesquisa deve colaborar com a análise de deformação da Rede GNSS/SP, identificando as estações com maior variação de deslocamento ao longo do período associado com esta investigação científica, bem como, possíveis correlações de movimentos decorrentes de fontes que podem causar tais deformações e/ou deslocamentos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, os conceitos de geodinâmica, teoria da elasticidade, análise de deformação e posicionamento GNSS são apresentados, relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa.

### 2.1 Dinâmica terrestre

A geodinâmica e a mudança global compreendem os processos e os elementos (componentes) do Sistema Terrestre: geosfera (camada sólida; núcleo, manto e litosfera), hidrosfera (camada líquida; rios, lagos, lagoas e mares), atmosfera (camada gasosa; troposfera, estratosfera, mesosfera, ionosfera e exosfera), criosfera (camada de gelo e neve; calotas polares, geleiras glaciais, blocos de gelo continentais, montanhas glaciais, lagos e rios gelados) e biosfera (camada ocupada por organismos vivos; todos os ecossistemas da Terra).

Dentre os componentes do Sistema Terrestre, a geosfera sofre deformação em decorrência da dinâmica das forças internas do planeta (p.ex.: movimento de placas tectônicas ou litosféricas). A cinemática da litosfera é o principal efeito da dinâmica que se desenvolve no interior da Terra. Assim, a descrição e quantificação do movimento das placas litosféricas tornou-se uma importante área de pesquisa desde a formulação da tectônica de placas (SÁ; SOUZA e VIEIRA, 2001).

A Terra pode ser dividida basicamente sob duas classificações distintas: uma se referindo a composição dos materiais geológicos (classificação estrutural) e outra é baseada em características de rigidez.

Na classificação sob o ponto estrutural, a Terra é dividida em três unidades principais: crosta, manto e núcleo.

A crosta terrestre é a camada superficial sendo dividida em crosta continental e crosta oceânica. A continental tem espessura média de 30 km e apresenta densidade de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, enquanto a crosta oceânica possui 7 km médios de espessura e densidade de 2,9 g/cm<sup>3</sup> (MASON & MOORE, 1982).

O manto é dividido em dois elementos: manto superior com cerca de 700 km e o manto inferior que pode atingir o limite de 2900 km de profundidade.

Foi identificado, pela primeira vez, em 1909, pelo sismólogo Andrija Mohorovic, um limite entre a crosta e o manto, conhecido por Descontinuidade de Mohorovicic; descontinuidade provocada pela diferença de propagação de ondas entre as duas camadas. Esse limite ocorre, pois a crosta apresenta características de baixa velocidade de ondas sísmicas, enquanto isso se aproxima do limite crosta-manto acontece um aumento considerável de ondas longitudinais (MASON & MOORE, 1982).

O Núcleo também é denominado de “Nife, Centrosfera, Barisfera ou Metalosferax”, devido sua composição básica. Dividido em duas componentes: o núcleo sólido, interno e com raio de cerca de 1.250 km, e o núcleo líquido, que envolve o primeiro. Acredita-se que o núcleo é essencialmente composto por Ferro e Níquel, contendo ainda outros elementos como o cobalto, cromo e manganês (ZEILLIK & GREGORY, 1998).

Na classificação baseada em características de rigidez, conhecida também como divisão reológica da Terra, são definidas em três camadas: litosfera, astenosfera e mesosfera.

A litosfera é a camada externa rígida que incluem a crosta e parte do manto superior com 100 a 400 km de espessura. Esta camada constitui as placas tectônicas. A sua parte superior é rígida para reter tensões elásticas em escala de tempo geológico (10 milhões de anos), enquanto a parte inferior é visco-elástica definido por temperaturas médias de 1100° a 1300° C (ALLEN; ALLEN, 2005).



A astenosfera é a camada que se posiciona abaixo da litosfera. Essa camada possui temperaturas mais elevadas sendo assim apresenta uma rigidez menor, sendo capaz de sofrer maiores deformações (ALLEN; ALLEN, 2005). A rigidez da astenosfera pode ser considerada como um fluido viscoso em longos períodos de tempo e como um sólido elástico para curtos períodos de tempo, como por exemplo, para a passagem das ondas sísmicas.

A mesosfera se encontra abaixo da astenosfera (ver figura 1). Essa camada apresenta alta viscosidade, ocasionada pelo aumento da pressão com profundidade.

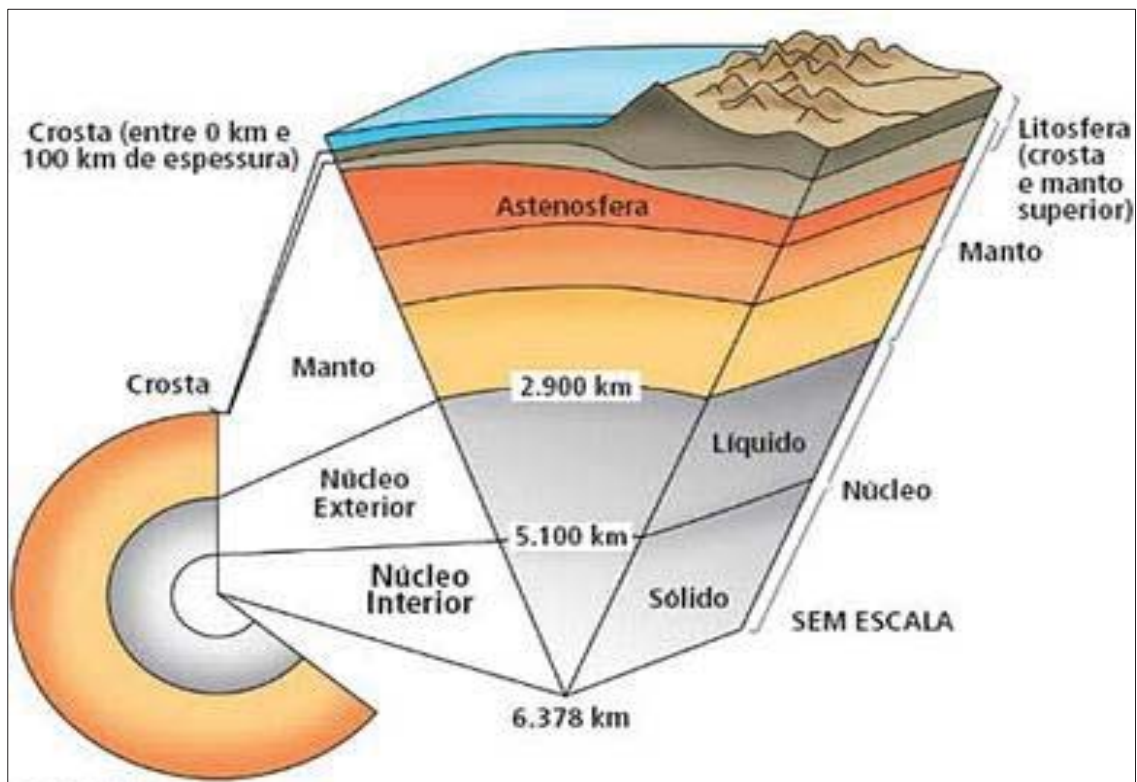


Figura 1 - Camadas composicionais e reológicas da Terra.  
Fonte: adaptado de USGS/USGov.

### 2.1.1 Movimento de Placas Tectônicas

A tectônica das placas, desenvolvida nos anos 60, pressupõe que a litosfera esteja fragmentada em certo número de placas que se movem umas em conexão com as outras, enquanto assentam sobre uma camada estrutural mais quente, menos rígida e deformante, a astenosfera. A relativa fluidez permite que as placas tectônicas se movimentem em diferentes direções. A figura 2 ilustra a divisão das placas tectônicas ao redor do planeta.



Figura 2 - Divisão das placas tectônicas

Fonte: <http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1266&sid=129>, acessado em 20/03/2014.

Existem três tipos de limites das placas litosféricas que tratam da maneira como as placas se deslocam umas sobre as outras. Os tipos de limites são: divergentes, convergentes e transformantes.

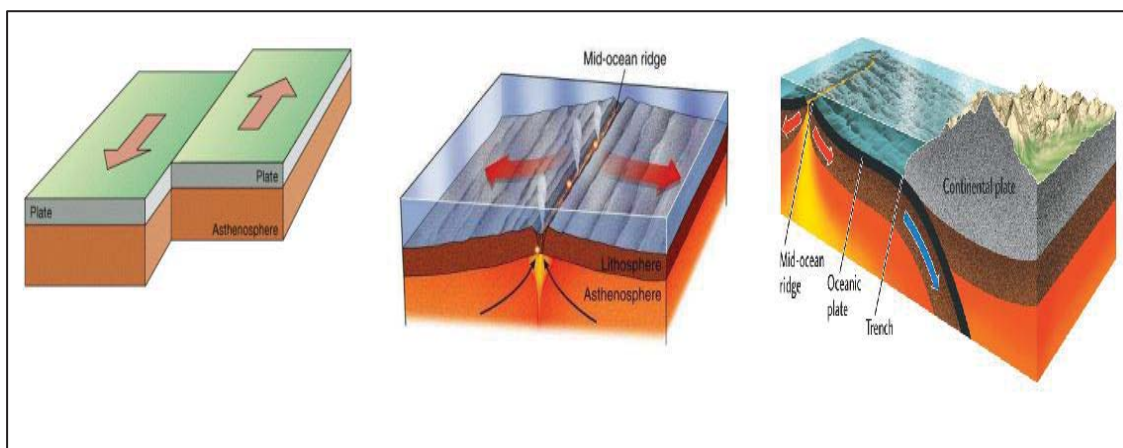
Em um limite divergente, o movimento conectivo ascendente do manto traz magma (material fluido do interior da Terra) para a superfície,

ocorrendo à formação de nova crosta oceânica. A cada nova entrada de material as placas litosféricas se afastam uma da outra.

Em um limite convergente, as placas litosféricas se movem uma de encontro à outra. No encontro entre duas placas, uma delas mergulha sob a menos densa e incorporada ao manto, num processo chamado de subducção. Por isso, neste tipo de limites, a sismicidade é elevada e a distribuição segue um padrão muito característico. Os sismos ocorrem numa faixa paralela à fossa oceânica, tendo origem nas placas em contato na zona de subducção (SUMMERFIELD, 1991).

No limite transformante, as placas adjacentes se deslocam paralelamente umas às outras, é denominado de deslizamento horizontal. Esse limite também é conhecido como conservativos.

Uns esquemas dos tipos de limites podem ser visto na figura 3.



**Figura 3 - Limite transformante, divergente e conservante.**  
Fonte: adaptado de ALLEN e ALLEN, (2005).

## 2.2 Teoria da elasticidade

A aplicação dos conceitos da teoria da elasticidade no monitoramento de estruturas é utilizada para investigar as deformações que ocorrem no corpo (objeto, estrutura) sujeito a forças externas. O conceito de corpo se estende ao planeta Terra, tais como placas litosféricas e regiões sujeitas a vulcanismo, ao soerguimento pós-glacial e a subsidência (SANTOS, 1999).

Segundo Borre (2006), a clássica teoria da elasticidade investiga o comportamento das deformações contínuas de sólidos sob a influência de forças exteriores. Para a resolução numérica de problemas da teoria da elasticidade, geralmente, devem ser resolvidas as equações diferenciais por processos de aproximação, usando as diferenças finitas ou métodos de elementos finitos.

Borre (2006) cita que existem estudos da deformação de redes geodésicas com aplicação da teoria da elasticidade, mas não utilizam uma analogia rigorosa dessa teoria. As principais ferramentas são os sistemas de equações diferenciais parciais e condições de contorno para os deslocamentos.

Para deduzir essas equações de uma forma clássica, as mesmas devem ser escritas considerando a energia elástica, que é o deslocamento em forma quadrática, e utilizam-se os métodos de cálculos das variações para minimizar a energia, satisfazendo-se, assim, os deslocamentos. Existem muitos métodos de aproximação discreta de problemas expressos por equações diferenciais parciais, o mais moderno é o método de elementos finitos (BORRE, 2006).

Para a rede geodésica, Borre (2006) se concentra em um único triângulo (o elemento finito) e encontra as contribuições normais com base nas observações diretamente relacionadas a este triângulo. São considerados quatro tipos de observações:

1. Observações da distância entre dois vértices da rede (distâncias absolutas);
2. Observações da distância de um vértice da rede para outro vértice (distâncias relativas), adicionando um  $\alpha$  constante, que é o mesmo para todas as observações deste tipo para o mesmo vértice;
3. Observações de direções (em radianos) para os lados de triângulos na rede (direções absolutas);
4. Observações de direções de um vértice da rede para outro vértice, (direções relativas), adicionando um  $\beta$  constante, que é o mesmo para todas as observações deste tipo para o mesmo vértice.

Uma vantagem de concentrar em um único triângulo é que pode-se escolher um sistema simples e sistemático para indexação dos cálculos.

Com base na teoria da elasticidade, um corpo quando submetido a ação de forças externas ou de tensões, sofre alterações na sua configuração original. A mudança de sua configuração é denominada deformação.

Deformação refere-se às modificações que um corpo deformável sofre com relação a sua forma e dimensão, o que implica também na alteração de suas posições relativas (LOVE, 1994).

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, 1994). 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 mantêm-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, sendo também reversível (THAPA, 1980).

A deformação infinitesimal relaciona as mudanças instantâneas do corpo à sua configuração instantânea (THAPA, 1980). A teoria de deformação infinitesimal 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.

### **2.2.1 Deformação**

Deformação refere-se à "ação ou resultado de deformar", ou seja, "modificar a 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).

Valliappan (1981) define deformação como uma mudança de configuração de um corpo que ocupa uma região no espaço e sofre alteração em sua geometria, quando submetido à ação de forças externas. Essa alteração (deslocamentos) corresponde às variações de coordenadas dos pontos deste corpo com relação a um referencial.

As posições e os deslocamentos de cada ponto do corpo podem ser escritos em função de suas coordenadas originais  $(x,y,z)$  ou finais  $(x',y',z')$ , em relação a um tempo  $(t)$  após sofrer deformação (VALLIAPPAN, 1981).

A descrição de Lagrange do vetor deslocamento  $(u)$  é definida como:

$$u = u(x, y, z, t). \quad (1)$$

A descrição de Euler é dado por:

$$u = u(x', y', z', t). \quad (2)$$

Sendo esses pontos definidos em referencial cartesiano  $(X,Y,Z)$  e assumindo os deslocamentos como funções contínuas das coordenadas, o tensor  $u_{i,j}$  representa o gradiente do vetor deslocamento, decomposto em uma parte simétrica  $(\varepsilon_{ij})$  e outra assimétrica  $(\omega_{ij})$ .

$$u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial u_j}, \quad (3)$$

$$u_{i,j} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) + \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i}). \quad (4)$$

A parte simétrica  $(\varepsilon_{ij})$  denomina-se tensor de deformação pequena, a parte assimétrica  $(\omega_{ij})$  denomina-se tensor de rotação. Esses tensores são representados das seguintes formas por Skrzypeck e Hetnarski<sup>2</sup> (1993) apud Chaves (2001) como:

---

<sup>2</sup> SKRZYPECK, J. J.; HETNARSKI, R. B. **Plasticity and Creep Theory, Examples, and Problems**, 1993.



$$\varepsilon_{ij} = \left\{ \begin{array}{ccc} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{array} \right\}, \quad (5)$$

$$\omega_{ij} = \left\{ \begin{array}{ccc} 0 & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 0 & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 0 \end{array} \right\}. \quad (6)$$

As rotações do vetor de rotação são assimétricas, então elas são escritas como (FUNG, 1994):

$$\omega_{ij} = \left\{ \begin{array}{ccc} 0 & -\omega_{yx} & -\omega_{zx} \\ \omega_{xy} & 0 & -\omega_{zy} \\ \omega_{xz} & \omega_{yz} & 0 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{ccc} 0 & -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) & -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 0 & -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 0 \end{array} \right\}. \quad (7)$$

O tensor de deformação simétrico pode ser escrito em função de notações indicial e de engenharia como (SKRZYPECK e HETNARSKI, 1993 apud CHAVES, 2001):

$$\varepsilon_{ij} = \left\{ \begin{array}{ccc} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zy} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{ccc} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \frac{1}{2} \gamma_{zx} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2} \gamma_{zy} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xz} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Timoshenko e Goodier (1980) definem as componentes de deformação na diagonal ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ) como alongamentos unitários, deformações lineares unitárias ou deformações específicas no ponto, nas direções X, Y, e Z. As componentes ( $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ ), representam as deformações angulares, relacionadas a estas mesmas direções.



As componentes de deformação podem ser relacionadas com as derivadas de deslocamento:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (11)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (12)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (13)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (14)$$

### 2.2.2 Modelo matemático de deformação

Segundo Gemael (1994), o modelo matemático é um sistema teórico ou um conceito abstrato pelo qual se descreve um fenômeno físico ou uma série de eventos. Este modelo, de modo óbvio, não representa fielmente o fenômeno real, mas apenas relaciona alguns aspectos ou propriedades que interessam à investigação. Os modelos matemáticos são artifícios muito usados nas investigações científicas e tecnológicas, por que reproduzem, conceitualmente, as interligações entre as variáveis conhecidas e as desconhecidas de um fenômeno físico, de uma maneira simplificada e adequada aos cálculos.

As componentes de deformação são determinadas com base nas observações feitas em pelo menos duas épocas diferentes. O modelo matemático de deformação relaciona as observáveis que utiliza-se de polinômios para referirem-se aos deslocamentos. O modelo de deformação pode ser apresentado por (CHEN 1983; SECORD 1985; KUANG 1996):

$$d(x, y, z; t - t_0) = B(x, y, z; t - t_0), \quad (15)$$

$$d(x, y, z; t - t_0) = \begin{pmatrix} u(x, y, z; t - t_0) \\ v(x, y, z; t - t_0) \\ w(x, y, z; t - t_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_u(x, y, z; t - t_0)c_u \\ B_v(x, y, z; t - t_0)c_v \\ B_w(x, y, z; t - t_0)c_w \end{pmatrix}. \quad (16)$$

onde:

$d$ : é o vetor de deslocamento do ponto de coordenadas  $(x, y, z)$ ;

$t_0$ : época inicial;

$t$ : época final;

$B$ : matriz das derivadas parciais dos polinômios com relação à  $x, y$  ou  $z$ ;

$c$ : corresponde ao vetor das incógnitas dos parâmetros de deformação.

Os polinômios de segunda ordem, para o caso bidimensional, com rotação  $\omega$  e origem em  $(x_c, y_c)$  são representados por (SECORD, 1995):

$$dx_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2 - \omega(y_i - y_c), \quad (17)$$

$$dy_i = b_0 + bx_i + b_2y_i + bx_iy_i + b_4x_i^2 + b_5y_i^2 - \omega(y_i - y_c). \quad (18)$$

## 2.3 Monitoramento de estruturas

Processos tectônicos, mudanças no nível da água, deslizamentos e outros fenômenos causam deformação na superfície da Terra. Assim é necessário um monitoramento de estruturas tanto naturais quanto às construídas pelo homem (artificiais), que estão na superfície da Terra, a fim de garantir segurança e auxiliar na prevenção de acidentes. A FIG (*International Federation of Surveyors*) desde o final da década de 70 e início de 80, vem concentrando os seus esforços no incentivo ao desenvolvimento de novas técnicas de monitoramento e análise geométrica de deformações (WELSH; HEUNECKE, 2001).

Dentre as técnicas de monitoramento de deformação têm-se as geotécnicas e geodésicas. Nas geotécnicas estão os métodos de medida direta, que utilizam equipamentos especiais para dimensionar as variações de comprimento, inclinação, pressão, etc. (TESKEY e PORTER<sup>3</sup>, 1988 apud CHAVES, 1994; CHRZANOWSKI, 1986). Por outro lado, nas técnicas geodésicas existem as redes de monitoração geodésica, redes de monitoração horizontal e redes de triangulação (CHEN, 1983). Como esta pesquisa se utiliza do segundo tipo de rede, na sequência, a mesma é apresentada.

### 2.3.1 Redes de monitoração geodésica

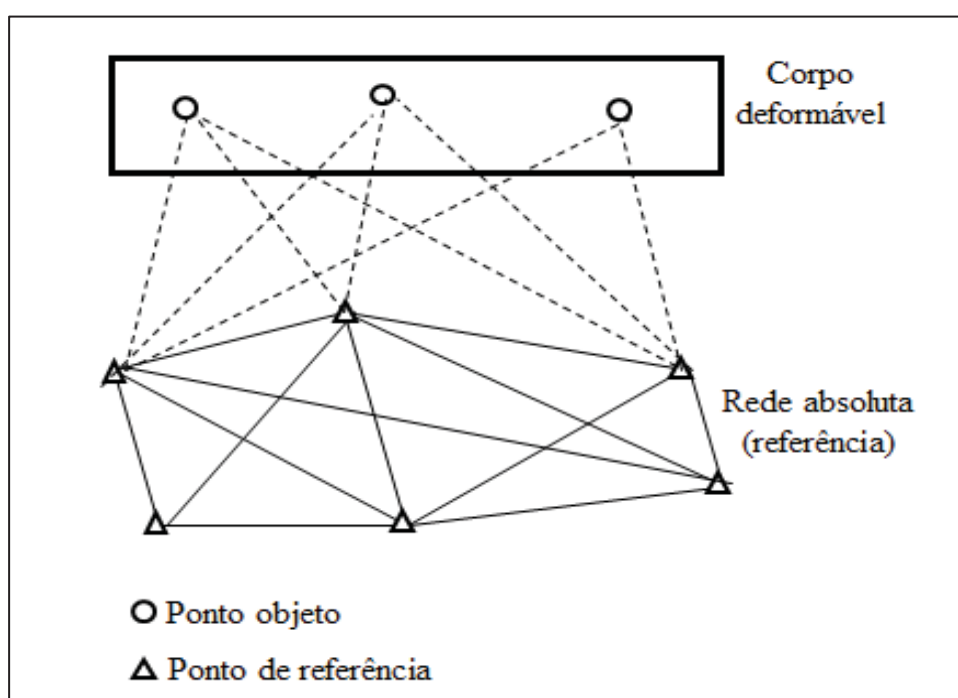
As redes de monitoração geodésica, segundo Chrzanowski (1986), são utilizadas para monitorar obras de engenharia como barragens, pontes, viadutos e etc., subsidência do solo em áreas de mineração ou extração de água subterrânea e também áreas sujeitas a movimentos

---

<sup>3</sup> TESKEY, W. F.; PORTER, T. R. **An integrated method for monitoring the deformation behavior of engineering structures**. Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, 1988.

tectônicos. Existem dois tipos básicos de redes de monitoração geodésica: absolutas e relativas.

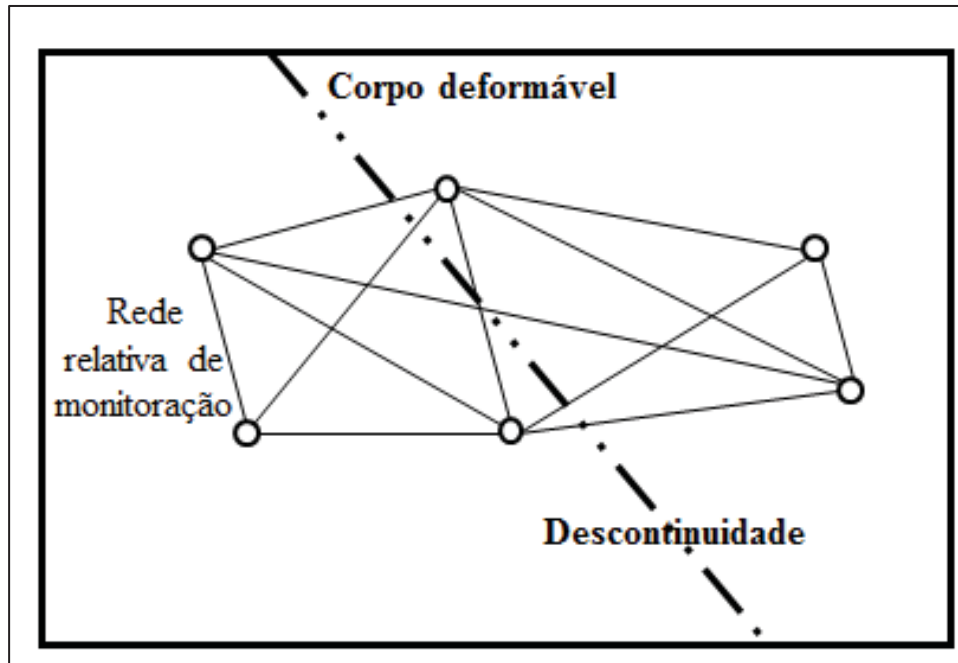
As redes geodésicas absolutas são aquelas onde os pontos de referência para a determinação dos deslocamentos dos pontos objetos, estão fora do corpo deformável. A figura 4 mostra a configuração desse tipo de rede. O principal problema na rede absoluta é a identificação de pontos de referência estáveis.



**Figura 4- Rede geodésica absoluta**

Fonte: Adaptado de Chzanowski (1986).

As redes geodésicas relativas são aquelas onde todos os pontos estão localizados no corpo deformável. A finalidade nesse caso é identificar o modelo de deformação causado pelas deformações, pelos deslocamentos relativos do corpo rígido e pelos deslocamentos pontuais. A configuração dessa rede é mostrada na figura 5.



**Figura 5- Rede geodésica relativa**

Fonte: Adaptado de Chzanowski (1986).

Em uma rede de monitoração geodésica, o objeto ou área a ser investigado é representado por um número de pontos que são permanentemente monumentados. Todos os pontos são observados em duas ou mais épocas. A rede de monitoramento geodésico pode ser convencional (terrestre), fotogramétrica e moderna (posicionamento por GNSS), ou, uma combinação destes tipos de rede.

## 2.4 Ajustamento de observações

A análise geométrica de deformação utiliza observações, sendo estas advindas de levantamentos geodésicos convencionais, levantamentos fotogramétricos ou pelo posicionamento por satélites GNSS, para os cálculos dos deslocamentos e parâmetros de observação. A existência de erros

aleatórios é uma característica inerente ao processo físico de medição, sendo, portanto, uma propriedade das observações.

Desta forma, para determinar uma medida com segurança e qualidade é necessário fazer mais observações dessa grandeza. Assim, têm-se vários resultados quando o que se deseja é um valor único, consistente e com uma indicação de sua qualidade. Para solucionar esta questão pode-se utilizar do método de ajustamento de observações, ou seja, pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

O ajustamento, entretanto, conduzirá a uma solução única, tornando as observações ajustadas consistentes com o modelo matemático adotado. Objetiva ainda a estimativa da qualidade da solução individual (desvio padrão) e do ajustamento como um todo (testes estatísticos da qualidade do ajustamento).

Na aplicação do MMQ exposto por Gemael (1994), considera-se um sistema de equações lineares não homogêneas, e inconsistente devidos aos erros nas observações do tipo:

$${}_n A_{u u} X_1 = {}_n L_{b1}, \quad (19)$$

onde:

$n$ : números de observações;

$u$ : número de incógnitas;

$A$ : matriz das derivadas parciais;

$X$ : vetor de incógnitas;

$L_b$ : vetor das observações.

Para resolver o problema de inconsistências do sistema, é introduzido o vetor de resíduos  $V$ :

$${}_n A_{u u} \hat{X}_1 = {}_n L_{b1} + {}_n V_1 = {}_n L_{a1}. \quad (20)$$

As observações ajustadas ( $L_a$ ) são obtidas, o que torna o modelo compatível e fornece um estimador imparcial  $\hat{X}$  para  $X$ , restando apenas a escolha do vetor  $V$ . Isso é tratado fazendo com que a soma dos quadrados dos resíduos escolhidos seja mínima:

$$\phi = V^T V = \min. \quad (21)$$

Como as observações não oferecem o mesmo grau de confiança é necessário ponderá-las utilizando de pesos. A matriz pesos ( $P$ ) é obtida por:

$${}_n P_n = \sigma_0^2 {}_n \Sigma L_{b_n}^{-1}, \quad (22)$$

onde:

$\Sigma L_{b_n}^{-1}$  : MVC das observações;

$\sigma_0^2$  : variância da unidade de peso a priori.

Mediante as considerações de pesos, o MMQ pode ser expresso por:

$$\phi = V^T P V = \min. \quad (23)$$

Dentre os métodos utilizados no ajustamento de observações, aqui será tratado o métodos de observações paramétricas.

O modelo funcional do método paramétrico é dado por:

$$L_a = F(X_a), \quad (24)$$

onde:

$L_a$  : vetor das observações ajustadas;

$F$ : modelo matemático funcional (linear ou não linear);

$X_a$ : vetor dos parâmetros ajustados.

O vetor das observações ajustada:

$$L_a = L_b + V, \quad (25)$$

onde:

$L_b$ : vetor dos valores observados;

$V$ : vetor dos resíduos.

E também:

$$X_a = X_0 + X, \quad (26)$$

onde:

$X_0$ : vetor cujas componentes são os valores aproximados dos parâmetros;

$X$ : vetor correção.

Em geral, a equação (20) é não linear, devendo ser linearizada usando o teorema de Taylor. Após a linearização a equação das observações pode ser escrita como:

$${}_nV_1 = {}_nA_u \cdot {}_uX_1 + {}_nL_1, \quad (27)$$

onde:

$A$ : matriz das derivadas parciais;

$L_0$ : vetor das observações calculadas em funções dos parâmetros aproximados;

$L$ : vetor dos termos independentes das equações de observação ( $L_0 - L_b$ ).

O modelo linearizado (equação 28) apresenta um número  $n$  de equações e resíduos e um número  $u$  de parâmetros. Minimizando a forma quadrática fundamental e realizando algumas manipulações matemáticas e algébricas tem-se o vetor de correções aos parâmetros aproximados:

$$X = N^{-1}U. \quad (28)$$



Sendo:

$$N = A^T P A, \quad (29)$$

$$U = A^T P L. \quad (30)$$

Após obter a estimativa dos parâmetros e observações ajustadas, deve-se estimar a Matriz Variância-Covariância (MVC) dos parâmetros ajustados ( $\sum X_a$ ), das observações ajustadas ( $\sum L_a$ ) e dos resíduos ( $\sum V$ ). A avaliação dessas matrizes é obtida aplicando a lei de propagação das covariâncias:

$$\sum X_a = \sigma_0^2 N^{-1}, \quad (31)$$

$$\sum L_a = \sigma_0^2 A N^{-1} A^T, \quad (32)$$

$$\sum V = \sum L_b + \sum L_a. \quad (33)$$

Após o ajustamento, pode-se calcular o valor variância a posteriori:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n-u}. \quad (34)$$

## 2.5 Análise de tendência de deslocamento das estações da rede analisada

A análise geodésica de deformação consiste em encontrar o modelo de deformação da estrutura em estudo. O modelo de deformação é obtido em função dos deslocamentos, que são determinados com a diferença

de coordenadas dos pontos em duas épocas distintas. Assim, é necessária uma verificação inicial dos dados para assegurar que as coordenadas nas duas épocas utilizadas sejam compatíveis.

Os fatores de variância a posteriori das duas épocas são testados (CASPARY, 1987; CHEN et al., 1990; HALIM et al., 2001):

$$H_0: \hat{\sigma}_{o1}^2 = \hat{\sigma}_{o2}^2, \quad (35)$$

$$H_a: \hat{\sigma}_{o1}^2 > \hat{\sigma}_{o2}^2, \quad \text{ou}, \quad H_a: \hat{\sigma}_{o2}^2 > \hat{\sigma}_{o1}^2, \quad (36)$$

sendo:

$\hat{\sigma}_{o1}^2$  e  $\hat{\sigma}_{o2}^2$ : os fatores de variância a posteriori para a primeira e segunda épocas;

Calcula-se a estatística utilizando-se as duas variâncias envolvidas:

$$F = \frac{\hat{\sigma}_{o1}^2}{\hat{\sigma}_{o2}^2}. \quad (37)$$

Esse valor é confrontado com um valor crítico  $F_{\alpha, S_1, S_2}$  obtido da distribuição de Fisher  $F$ , a um nível de significância  $\alpha$  e com  $S_1$  e  $S_2$  graus de liberdade de  $\hat{\sigma}_{o1}^2$  e  $\hat{\sigma}_{o2}^2$ , respectivamente. A hipótese nula será aceita se:

$$F < F_{\alpha, S_1, S_2}. \quad (38)$$

Após os fatores a posteriori das duas épocas serem aceitos, calcula-se o vetor deslocamento:

$$d = X_j - X_i, \quad (39)$$

onde:

$X_i$  e  $X_j$ : são as coordenadas tridimensionais  $(x, y, z)_{i,j}$  estimadas na primeira e segunda épocas;

$d$ : é o vetor deslocamento.

Para estimar a tendência dos movimentos (deslocamentos) aplica-se o teste de congruência global.

### 2.5.1 Teste de congruência global

O teste de congruência global detecta estatisticamente se existem diferenças significativas de coordenadas em duas épocas, ou seja, o deslocamento ( $d$ ). O objetivo desse teste é verificar se um conjunto de pontos, comuns em ambas as épocas, permaneceu estável ou não.

As hipóteses nula e alternativa para o respectivo teste são (HALIM et al., 2001; FAZAN, 2010):

$$H_0: E\{d\} = 0, \quad (40)$$

$$H_a: E\{d\} \neq 0. \quad (41)$$

A MVC ( $\Sigma d$ ) do deslocamento é obtida por:

$$\Sigma d = \Sigma X_i + \Sigma X_j, \quad (42)$$

sendo:

$\Sigma X_i$  e  $\Sigma X_j$ : MVC das coordenadas para as épocas  $i$  e  $j$ ;

O número de graus de liberdade e a variância a posteriori entre as épocas são calculados por:

$$r_{ij} = r_i + r_j, \quad (43)$$

$$\sigma_{o_{ij}}^2 = \frac{(r_i \sigma_i^2 + r_j \sigma_j^2)}{(r_i + r_j)}, \quad (44)$$

onde:

$r_i$ : graus de liberdade da primeira época;

$r_j$ : graus de liberdade da segunda época;

$r_{ij}$ : número de graus de liberdade entre as épocas  $i$  e  $j$ ;

$\sigma_{o_{ij}}^2$ : variância a posteriori entre as épocas  $i$  e  $j$ .

Na aplicação do respectivo teste, calcula-se o valor da razão das variâncias entre as duas épocas (CASPARY, 2000; FAZAN, 2010):

$$F_c = \omega / \sigma_{o_{ij}}^2, \quad (45)$$

sendo:

$$\omega = \frac{d^T \Sigma d^{-1} d}{h}, \quad (46)$$

onde:

$h$ : característica (*rank*) de  $\Sigma d$ .

A hipótese nula é aceita a um nível de significância ( $\alpha$ ) caso:

$$F_c \leq F_{\alpha, h, r}. \quad (47)$$

A rejeição da hipótese nula indica a ocorrência de deslocamento entre as duas épocas.

O teste de congruência global é uma ferramenta importante para a determinação de tendências dos pontos que formam a rede, verificado antes

da aplicação dos fundamentos da teoria da elasticidade para a identificação do modelo de deformação da área de estudo.

## **2.6 GNSS no monitoramento de estruturas**

Segundo Schneider (1982), os principais objetivos da Geodésia, por muitos séculos, foi a determinação da forma da Terra e o seu campo de gravidade. Mas, a Geodésia da era moderna é caracterizada por um tratamento sistemático de todos os fenômenos dinâmicos que alteram a forma e o campo de gravidade da terra e, conseqüentemente, influenciam as posições dos pontos sobre ela.

A Geodésia desempenha um papel importante nesta pesquisa, fornecendo informação geométrica sobre a deformação temporal da superfície terrestre. A análise da rede geodésica de monitoramento é realizada a fim de detectar as deformações da superfície associada com eventos sísmicos. Na Comissão de Geodésia (1978) foi apresentado que as técnicas geodésicas são cada vez mais utilizadas na investigação de movimentos tectônicos e na deformação da crosta terrestre (SCHNEIDER, 1982).

Nas últimas décadas, vem crescendo significativamente o interesse no monitoramento de estruturas apoiadas por técnicas GNSS. Isso pode ser confirmado ao verificar as publicações relacionadas a este assunto. Chaves (2001) destaca o GPS como uma poderosa ferramenta no monitoramento de estruturas.

De acordo com Perez (2002), o GPS é uma ferramenta vital para a Geodinâmica em aplicações que requerem alta precisão, tais como: monitoramento e análise de movimento e deformação das placas litosféricas, previsão de terremotos, entre outras.

Featherstone et al. (2003) utilizam de uma rede geodésica de monitoramento para detectar atividades sísmicas intraplaca no região central

da Austrália; a pesquisa de Soto (2006) monitora as deformações de pontos da rede do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), situados em áreas com atividade tectônica.

Costa et al. (2009) em seu estudo determinou a velocidade de deslocamento das placas por meio de processamentos de dados GNSS da rede SIRGAS-CON. Ruegg et al. (2009) em seu trabalho, analisou o acúmulo de tensão intersísmica com observações GPS na região de Constitución e Concepción no Chile.

No estudo de Silva et al. (2010), utilizando dados GNSS, foi determinado o deslocamento das estações da rede SIRGAS em função do terremoto ocorrido no Chile, em 27 de fevereiro de 2010

## **2.7 Observáveis GNSS**

Todas as medições GNSS, sejam elas pseudodistância ou fase da portadora, são afetadas por erros que alteram a precisão da determinação da posição. Existem várias fontes de erros com diferentes características de magnitude, periodicidade, a dependência do satélite–receptor, entre outros. Entre estes erros estão os associados com as efemérides, os erros de relógio do satélite, os erros do relógio do receptor, efeitos ionosféricos, efeitos neutrosféricos e a forma geométrica do satélite–receptor. Além destes erros, têm-se aqueles relacionados com a antena, ou seja, com o sinal indireto que chega à mesma, denominado por multicaminho.

### 2.7.1 As observáveis GNSS: características

As observáveis básicas do GNSS que permitem determinar a posição, velocidade e tempo, podem ser identificadas como (SEEBER, 2003):

- pseudodistância;
- fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

A medida de pseudodistância é obtida da correlação entre o código gerado pelo satélite no instante de transmissão ( $t_t$ ) e sua réplica gerada no receptor no instante de recepção ( $t_r$ ). A equação da pseudodistância entre o satélite  $s$  e o receptor  $r$  pode ser escrita como (MONICO, 2008):

$$PD_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + Ion_r^s + Neutro_r^s + dm_r^s + dm_r^s + \varepsilon_{PD_r^s}, \quad (48)$$

onde:

$\rho_r^s$ : distância geométrica entre o satélite, no instante de transmissão do sinal, e o receptor, no instante de recepção do sinal;

$c$ : velocidade da luz no vácuo, em m/s;

$dt_r$ : erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS, em segundos;

$dt^s$ : erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS, em segundos;

$Ion_r^s$ : erro causado pela ionosférica, em metros;

$Neutro_r^s$ : erro causado pela neutrosfera, em metros;

$dm_r^s$ : erro causado pelo multicaminho, em metros;

$\varepsilon_{PD_r^s}$ : erro da medida de pseudodistância devido aos efeitos não modelados e aleatórios, em metros.

A medida da fase de batimento da onda portadora é obtida da diferença entre a fase gerada pelo satélite, no instante de transmissão do sinal,

e sua réplica gerada pelo receptor, no instante de recepção do sinal. Apenas uma medida fracionária é obtida, restando um número inteiro de ciclos desconhecido, denominado ambiguidade (N). A equação da fase de batimento da onda portadora pode ser escrita como (MONICO, 2008):

$$\phi_r^s(t) = f \left( \frac{\rho_r^s - Ion_r^s + Trop_r^s + dm_r^s}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + (\phi_t^e(t_0) - \phi_r(t_0)) + N_r^s + \varepsilon_{\phi_r}^s, \quad (49)$$

onde:

$f$ : frequência da fase;

$\phi_t^e(t_0)$ : fase gerada no satélite, na época de referência  $t_0$ ;

$\phi_r(t_0)$ : fase recebida no receptor, na época de referência  $t_0$ ;

$N_r^s$ : ambiguidade da fase;

$\varepsilon_{\phi_r}^s$ : erro da fase da onda portadora.

Os receptores medem a parte fracionária da portadora e efetuam a contagem do número de ciclos que entram no receptor a partir daí, o que resulta em uma medida contínua. O termo ( $N_r^s$ ) denominado como ambiguidade, representa o número de ciclos inteiros entre as antenas do satélite e receptor, no instante que o receptor é ligado (MONICO, 2008).

### 2.7.2 Erros associados ao posicionamento GNSS

Quando se utilizam as observáveis GNSS, é importante levar em consideração a existência de possíveis erros associados às observações, erros esses que podem ser de natureza sistemática, aleatória ou grosseira. A tabela 1, apresentada a seguir mostra os erros envolvidos nas observáveis GPS, bem como suas fontes:



Tabela 1 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos nas observações GPS

<b>Fontes</b>	<b>Erros/Efeitos</b>
<b>Satélite</b>	Erro da órbita; erro do relógio; relatividade; atraso entre as portadoras no hardware do satélite; centro de fase da antena do satélite, fase <i>wind-up</i> .
<b>Propagação do sinal</b>	Erros relacionados à neutrosfera e à ionosfera; perdas de ciclos; multicaminho ou sinais refletidos; rotação da Terra.
<b>Receptor/Antena</b>	Erro do relógio; erro entre os canais; atraso entre as portadoras no hardware do satélite; centro de fase da antena do receptor; fase <i>wind-up</i> .
<b>Estação</b>	Erro nas coordenadas; multicaminho ou sinais refletidos; marés terrestres; movimento do pólo; carga oceânica; pressão da atmosfera

Fonte: Adaptado de Mônico (2008)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa proposta é de caráter experimental e científico, onde investiga-se a aplicação da fundamentação da teoria da elasticidade em estações da Rede GNSS/SP, com processamento dos dados GNSS (GPS) em programa científico, ajustamento da rede e análise geodésica de deformação a fim de verificar a deformação na superfície terrestre. O objeto de estudo é a região oeste de São Paulo representada por estações da Rede GNSS/SP.

A análise proposta nesta pesquisa é dividida em dois módulos:

- Coleta de dados e estimativa de deslocamentos.
- Análise geodésica de deformação.

Os materiais e equipamentos a serem utilizados neste projeto de mestrado foram:

- Dados das estações pertencentes a Rede GNSS/SP. Uma descrição da rede e das estações a ser utilizada nesse projeto será apresentada no próximo tópico.
- Servidor da FCT/UNESP, adquirido para pesquisa por projeto da FAPESP 2008/09947-2.
- Software científico para processamento dos dados GNSS.

Para alcançar os objetivos propostos foi realizado, primeiramente, uma análise minuciosa das referências bibliográficas citadas nesta dissertação a fim de aplicar a fundamentação da teoria da elasticidade nas estações da rede de estudo.

O esquema da metodologia desta pesquisa é apresentado na figura 6, onde cada etapa que o compõe é detalhada posteriormente.

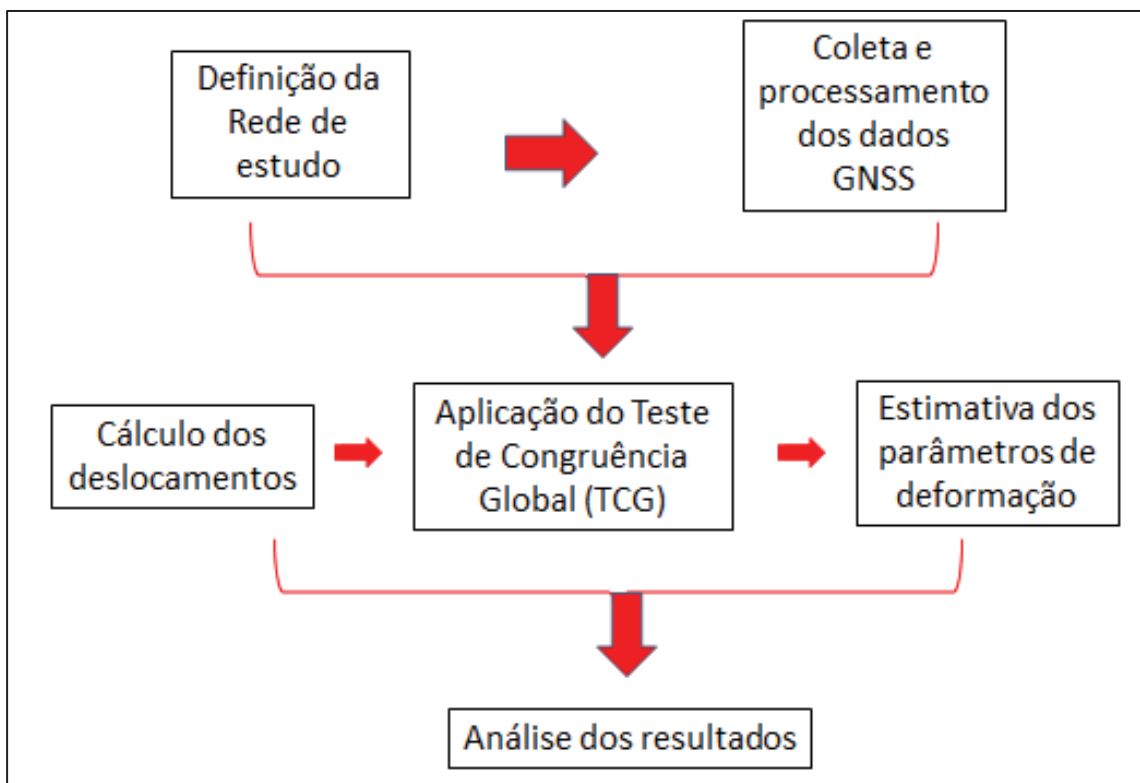


Figura 6 – Fluxograma preliminar da metodologia

A rede geodésica escolhida como objeto de estudo para este projeto de pesquisa é a Rede GNSS/SP no estado de São Paulo. A escolha dessa rede se dá pelo fato de ter projetos de pesquisas (processos 04/09235-1 e 04/03384-5) conduzidos pela FCT/UNESP e financiados pela FAPESP.

### 3.1 Área de estudo: Rede GNSS São Paulo

A Rede GNSS/SP permanente foi estabelecida com objetivo de desempenhar o papel de estações de referência, eliminando a necessidade de o usuário imobilizar um receptor em um ponto, uma vez que os seus arquivos de dados de rastreamento (RINEX) são disponibilizados gratuitamente em um formato padrão internacional na Internet. A Rede GNSS/SP foi materializada com o intuito de aumentar o número de estações GNSS ativas no estado de São Paulo.

(figura 7). Atualmente, treze estações ativas homologadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) disponibilizam dados em tempo real.

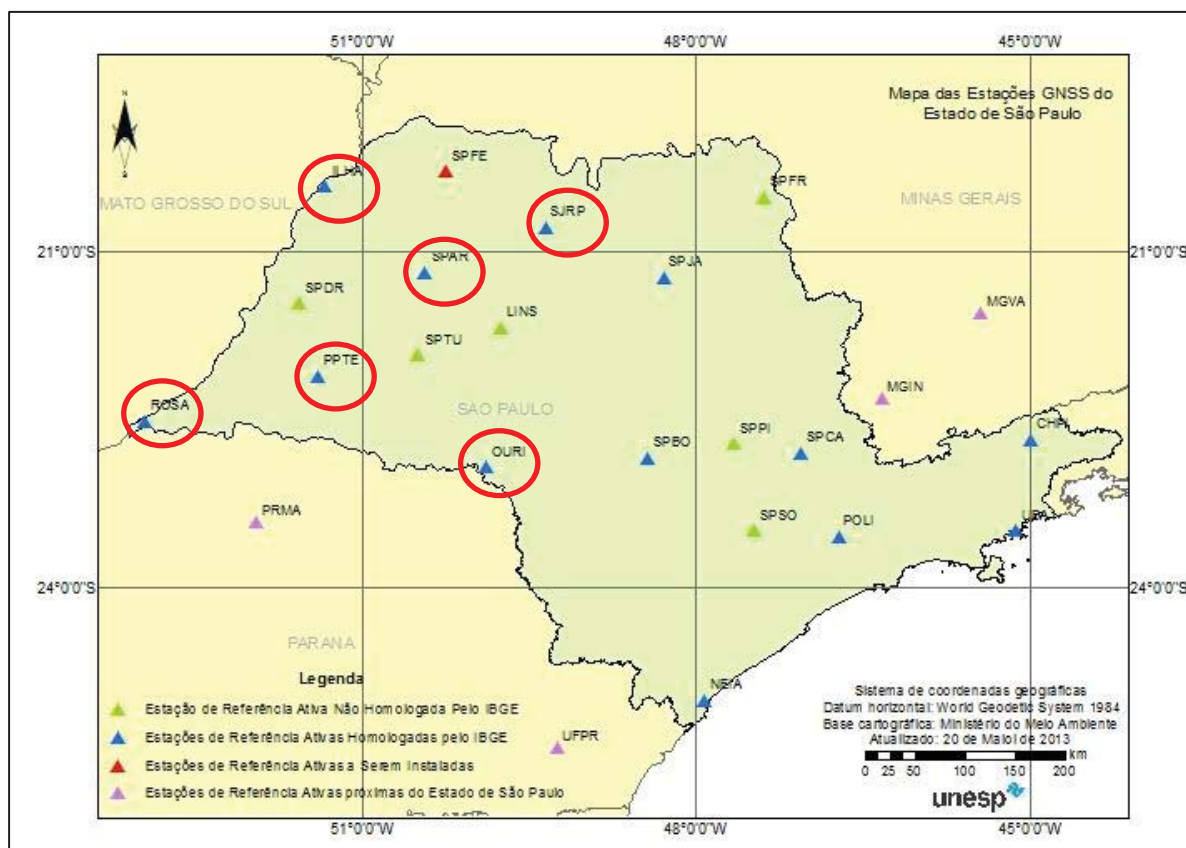


Figura 7 - Rede GNSS São Paulo.

Fonte: disponível em: <http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/rede-gnss-sp2089/>, acessado em 20/01/2013.

Os processos de deformação da superfície terrestre estão relacionados com base nas mudanças de posição de estações referenciadas a esta superfície. A estrutura geodésica a ser analisada nesta pesquisa é constituída pelas seguintes estações pertencentes à Rede GNSS/SP:

- Rosana (ROSA);
- Ilha Solteira (ILHA);
- Presidente Prudente (PPTTE);
- Araçatuba (SPAR);

- São José do Rio Preto (SJRP); e
- Ourinhos (OURI).

Para servir de referência no processamento e ajustamento da rede monitorada foram escolhidas estações pertencentes à Rede IGS – *International GNSS Service* – em território brasileiro. As estações foram selecionadas com base no relatório No. 86 do DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*) sendo estas algumas das estações adotadas na última realização do SIRGAS:

- BRAZ;
- CHPI;
- UFPR;
- SAVO.

### **3.2 Processamento dos dados GNSS**

Para o processamento dos dados GNSS, utiliza-se o software GAMIT (*GPS Analysis at MIT*), desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), no Departamento da Terra, Atmosfera e Ciências Planetárias, no modo relativo, no servidor instalado na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), adquirido por projeto de pesquisa da FAPESP. Para o ajustamento e definição do referencial das estações utiliza-se o software GLOBK (*Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program*), também desenvolvido pelo MIT e acessado de forma remota, via servidor com SSH (*Secure Shell for Workstation*).

O GAMIT/GLOBK consiste num conjunto de programas para estimar os parâmetros como coordenadas e velocidades de estações, atrasos atmosféricos, órbitas dos satélites e parâmetros de orientação da Terra.

Como o deslocamento de cada estação resulta da diferença de coordenadas entre duas épocas consideradas, as posições de cada estação são geradas dos processamentos com o programa GAMIT, obtendo-se as coordenadas e sua Matriz Variância-Covariância (MVC). Esses são os dados de entrada para o GLOBK, para estimar posições e velocidades.

A estratégia de processamento é a mesma adotada pelos Centros de processamento do SIRGAS, disponível em sua página (Guia: [http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Guias/2013\\_08\\_Guidelines\\_for\\_SIRGAS\\_Analysis\\_Centers\\_V2\\_1.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Guias/2013_08_Guidelines_for_SIRGAS_Analysis_Centers_V2_1.pdf)), 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.

Alguns dados adotados, manipulados no arquivo *sestbl*. do Gamit. Esse arquivo é responsável pela manipulação da estratégia de processamento. Alguns dados foram: taxa de observação de 30 segundos; máscara de elevação de 3°; ponderação das observações em função da elevação; órbitas e correções dos relógios dos satélites e parâmetros de orientação da Terra disponibilizados pelo IGS; valores de correções de calibrações absolutas dos centros de fase da antena publicadas pelo IGS (*igs.atx*); estimativa do atraso zenital em virtude da refração troposférica para intervalo de duas horas (13 correções para cada estação segundo Herring, King e McClusky (2010)); fixação do número inteiro de ambiguidades da fase na solução final.

Nesta pesquisa, foi elaborado um processo de automatização de coleta de dados com base em *scripts* para rotinas 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, com base nos mesmos realizam-se os processamentos.

Nessa etapa, são criados diretórios para copiar todos os arquivos necessários. Esse script faz a junção automática de todas as tabelas de dados padrões, arquivos de controle e o arquivo que especifica o ambiente computacional.

### 3.2.1 Preparação dos arquivos globais e específicos das estações e do experimento

O processamento inicia-se com a atualização dos arquivos Globais do programa, que são atualizados para cada ano de processamento. Esses arquivos são encontrados no diretório *gg/tables* no software GAMIT. Os arquivos globais necessários para o processamento do experimento são:

- *nutations (nutabl.)*: contém os parâmetros de nutação para a transformação entre um sistema inercial e um sistema fixo à Terra;
- *lunar e solar ephemerides (soltab. e luntab.)*: *soltab.* é a efeméride tabular solar, ou seja, é a tabulação de uma posição da Terra em relação ao Sol. *luntab.* é a efeméride tabular lunar que contém a posição x,y e z da Lua para a data juliana;
- *geodetic datums (gdetic.dat)*: tabela que contém informações dos datums geodésicos, especificados pelos parâmetros de elipsóide padrão, semi-eixo maior (em metros) e o inverso do achatamento. São encontrados também, os deslocamentos cartesianos (em metros) com relação ao geocentro;
- *leap seconds (leap.sec)*: este arquivo é uma tabela com o salto de segundos do UTC (Tempo Universal Coordenado), valor que se refere à diferença entre o UTC e o TAI na época de início da contagem do tempo GPS, diferença (TAI - UTC) desde 1º de Janeiro de 1982;
- *earth rotation (pole. e ut1.)*: *pole.* Tabela que contém valores do movimento polar em forma de quadros para a interpolação em diferentes módulos do GAMIT. *ut1.* arquivo com os valores da diferença TAI-UT1;

- *ocean tides (stations.oct e grid.oct)*: tabelas com os parâmetros da carga de marés oceânicas das estações e da rede global;
- *spacecraft, receiver e antenna characteristics (svnav.dat, antmod.dat e rcvant.dat)*: *svnav.dat* contém as informações de satélites GPS; *antmod.dat* constitui-se de uma tabela de deslocamentos do centro de fase da antena e as variações em função da altitude e do azimute; *rcvant.dat* é as correspondências entre códigos de 6 caracteres e os nomes completos dos receptores e antenas utilizadas nos arquivos RINEX.

Todos os arquivos foram atualizados do Centro de Determinação de Órbita da Europa (CODE - *Center for Orbit Determination in Europe*) (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>), o qual é um dos centros de análises do *International GNSS Service* (IGS).

### 3.2.2 Coleta de dados e processamento de forma automática

O processamento de forma automática tem como objetivo principal diminuir o tempo de coleta e processamento dos dados.

A preparação dos dados para realizar o processamento se inicia com a criação do diretório do processamento e subdiretórios para o download de todos os arquivos de observação das estações, das efemérides transmitidas e das órbitas precisas dos satélites e, posteriormente, realizar os processamentos. Os seguintes subdiretórios são criados e definidos:

- *brdc*: constituído das efemérides transmitidas;
- *igs*: constituído pelas efemérides precisas;
- *rinex*: que corresponde aos arquivos de observação.

Posteriormente, faz-se a execução do *script sh\_setup* no diretório do experimento, o qual faz a ligação com os arquivos globais e de controle *process.defaults* e *sites.defaults*. Esses arquivos são editados conforme o



experimento. O arquivo `process.defaults` especifica o ambiente computacional, as fontes de dados internos e externos e arquivos de órbita, a taxa de observação e o número de épocas e instrução para os resultados de arquivamento. Já o `sites.defaults` é editado para especificar as estações IGS que devem ser utilizadas no experimento e como os dados de registro da estação devem ser tratados.

As principais estratégias adotadas no processamento dos dados GNSS deste trabalho foram:

- Ângulo de elevação: 03°;
- Taxa de observação: 30 segundos;
- Modelo da carga oceânica: FES2004;
- Função de mapeamento: GMF;
- Variação do centro de fase: absoluta;
- Soluções fracamente injuncionadas com desvio padrão +/- 1 m;
- Observáveis da fase de batimento L1 e L2, e códigos C/A e P2;
- Combinação linear LC\_AUTCLN;

Após a manipulação dos dados, a execução do GAMIT se faz com o script `sh_gamit`:

```
sh_gamit -expt <expt> -s <aaaa> <ddd> ' <ddd>' - noftp >&! sh_gamit.log
```

O parâmetro `'-expt'` indica qual é o experimento a ser processado; o parâmetro `'-s'` indica o intervalo de dias, é preciso indicar o ano dos dados de observação presentes no experimento `<aaaa>` e o dia de início e término do processamento. O parâmetro `'-noftp'` impede que sejam buscados dados online durante o processamento e a última sentença do comando gera um arquivo `'log'` para diagnosticar os pontos e razões de eventuais falhas no processamento.

Ao executar o GAMIT alguns arquivos são gerados, contudo tem-se um arquivo muito importante usado como entrada para o GLOBK o `H-file`,

que contém a matriz de covariância e parâmetros do ajustamento para a solução gerada com injunções fracas “loose constraints”.

Assim, as soluções geradas pelo GAMIT, os H-files, são os principais arquivos de entrada para o GLOBK. As soluções no modelo *glorg*, produzem um arquivo com extensão \*.org contendo informações das combinações.

No Apêndice A, são encontrados exemplos do trecho do arquivo (*glorg*) gerado após processamento dos dados GNSS com o programa GAMIT.

### **3.2.3 Estimação de parâmetros pelo software GAMIT**

O GAMIT incorpora algoritmos de mínimos quadrados ponderados para estimar a posição relativa de um conjunto de estações, parâmetros orbitais e de rotação da Terra, os atrasos zenitais, e ambiguidades da fase da onda portadora.

Sendo este modelo matemático que relaciona as observações e parâmetros não lineares, assim são produzidas soluções para conseguir obter as coordenadas das estações dentro de poucos milímetros. O GAMIT é usado para produzir cálculos e uma matriz de covariância associada às posições da estação e (opcionalmente) parâmetros orbitais e de rotação da Terra, que são depois dados de entrada para o GLOBK que estima as posições e velocidades.

Para os cálculos dos parâmetros, o GAMIT utiliza a estatística pelo ajustamento dos mínimos quadrados, onde as formulações matemáticas são citadas na subseção 2.3.

### 3.2.4 Análise das soluções diárias

Para determinar se o processamento da fase da portadora produziu bom resultado é necessário analisar se todos os dados, arquivos de observações bem como os dados da estratégia de processamento, foram incluídos, se os dados ajustam o modelo num nível esperado e se as incertezas são aceitavelmente pequenas (HERRING; KING e MCCLUSKY, 2009). Para isso, analisa-se o arquivo *sh\_gamit\_ddd.summary*.

O principal indicador utilizado para avaliar a qualidade da solução é o erro médio quadrático normatizado (*Postfit nrms*) que se encontra no Q-file depois da execução do modo *.solve*. Uma boa distribuição dos dados e os pesos a priori corretos, a solução geralmente produz um *nrms* em torno de 0.25. Já valores maiores que 0,5 indicam que há perdas de ciclos “cycle slips” ou erros associados à tendência “bias”.

Os resíduos em forma de erro médio quadrático por satélite e estação são escritos no arquivo *autcln.sum.post*, que mostra a qualidade relativa de estações na rede. Outra verificação dos dados e processamento é fornecida pela série temporal gerada pelo *sh\_glred*.

### 3.2.5 Combinação das soluções

O ajustamento e combinação dos dados processado é feito executando o software GLOBK, utilizando o script *sh\_glred*:

```
sh_glred -expt <expt> -s <aaaa> <ddd> <AAAA> <DDD>-net MIT
opt H L C G E S >&! sh_gamit.log
```

O parâmetro ‘*-expt*’ indica qual é o experimento a ser ajustado, o parâmetro ‘*-s*’ o intervalo de dias, sendo assim, é preciso indicar o ano de

início dos dados processados presentes no experimento <aaaa>, o dia de início <DDD>, ano e o dia do término, respectivamente <AAAA> e <DDD>. O parâmetro <net MIT> busca as soluções disponíveis pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) na Internet. A opção *H* impõe ao software utilizar as soluções já processadas, a opção *LC* combina as soluções processadas no experimento com soluções disponíveis pelo MIT. A opção *G* cria a repetibilidade dos dados, a opção *E* permite a criação das séries temporais e por fim a opção *S* salva as linhas de comandos em um arquivo de controle.

Com os dados combinados, há a possibilidade de se gerar séries temporais da época de estudo para cada estação.

Nesta pesquisa, foram utilizados dados GNSS de três anos (2010, 2011 e 2012), período escolhido de acordo com o estudo realizado por Biessy (2011), suficiente para detectar deslocamentos. Esses dados foram combinados, sendo que algumas estações não tinham dados em determinadas épocas do ano. Na tabela 2 são apresentadas as campanhas utilizadas nas análises de deformação.

A época de referência do processamento dos dados foi escolhida a primeira quinzena dos dados de 2010 para possibilitar a análise de estabilidade dos pontos de referência e da rede. O restante das campanhas foram processadas e combinadas a cada semestre, para analisar o comportamento das estações ao longo de cada ano.

**Tabela 2 - Épocas para análises de deformação**

Campanha	Época
1ª campanha	1º quinzena de 2010
2ª campanha	1º semestre de 2010
3ª campanha	2º semestre de 2010
4ª campanha	1º semestre de 2011
5ª campanha	2º semestre de 2011
6ª campanha	1º semestre de 2012
7ª campanha	2º semestre de 2012

### 3.3 Teste de Congruência Global

O Teste de Congruência Global (TCG) foi realizado aplicando a teoria que se encontra descrita na seção 2.5. Foi conduzido por meio de rotinas desenvolvidas no software Scilab versão 5.4.1.

Os dados de entrada são as coordenadas, as respectivas matrizes variância-covariância do ajustamento de quaisquer duas campanhas (épocas) diferentes e os graus de liberdade. Primeiramente, calculam-se os deslocamentos dos pontos a serem analisados. Em seguida, aplica-se o TCG para a verificação de deslocamento em cada ponto da rede e nos pontos de referência.

A primeira campanha é utilizada como referência para as análises de deformação com as demais épocas, aplicando-se o TCG, conforme apresentado na tabela 3. Os resultados e análises serão demonstrados na próxima seção e um exemplo da sequência de cálculo é apresentado no Apêndice B.

**Tabela 3 - Esquema da combinação das campanhas para aplicação do TCG**

Combinação	
1ª campanha	2ª campanha
1ª campanha	3ª campanha
1ª campanha	4ª campanha
1ª campanha	5ª campanha
1ª campanha	6ª campanha

### 3.4 Estimativa dos parâmetros de deformação

Para estimar os parâmetros de deformação em função dos deslocamentos, 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.

O problema ora colocado consiste na determinação das componentes do tensor de deformação, a partir da relação existente entre elas e os deslocamentos. Nesta relação, os parâmetros da deformação são expressos como derivadas parciais de primeira ordem da função deslocamento (SANTOS, 1999). Então, para a determinação das componentes do vetor deformação é necessário que a função deslocamento seja remodelada. Seja a função deslocamento definida como uma função vetorial por:

O vetor de deslocamentos ( $u$ ) constitui-se pelas componentes de deslocamento do ponto ( $u_i, v_i$ ):

$$u = u(x, y), \quad (50)$$

$$v = v(x, y) \quad (51)$$

$$w = w(x, y) \quad (52)$$

Estas funções podem ser desenvolvidas em um polinômio de primeira ordem do tipo:

$$u(x, y) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0), \quad (53)$$

$$v(x, y) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0), \quad (54)$$

$$w(x, y) = c_0 + c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0), \quad (55)$$

onde:

$(x_0, y_0)$  representam as coordenadas do vértice analisado;

$(x, y)$  as coordenadas do vértice vizinho;

as diferenças  $(x - x_0)$  e  $(y - y_0)$  indicam que o vértice analisado se constitui na origem de um sistema local de coordenadas;

os coeficientes  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2$  e  $c_2$  são considerados como aproximações das derivadas parciais da função deslocamento;

$a_0, b_0$  e  $c_0$  são as translações.

Ainda conforme Santos (1999) para o cálculo dos parâmetros de deformação (incógnitas do mesmo problema), pode-se fazer uso das equações 56, para a vizinhança de cada vértice a ser analisado. Considerando como  $n$  o número de vértices integrantes da vizinhança do ponto analisado, neste caso,  $n$  é considerado o número de pontos estáveis, tem-se um conjunto de  $3n$  equações a 9 incógnitas. Quando o número de pontos vizinhos for maior do que 3, pode-se partir para um processo de ajustamento usando-se, p.ex., o critério dos mínimos quadrados (GEMAEL, 1994).

$$\left[ \begin{array}{l} u(x_1, y_1) = a_0 + a_1(x_1 - x_0) + a_2(y_1 - y_0) \\ v(x_1, y_1) = b_0 + b_1(x_1 - x_0) + b_2(y_1 - y_0) \\ w(x_1, y_1) = c_0 + c_1(x_1 - x_0) + c_2(y_1 - y_0) \\ \vdots \\ u(x_n, y_n) = a_0 + a_1(x_n - x_0) + a_2(y_n - y_0) \\ v(x_n, y_n) = b_0 + b_1(x_n - x_0) + b_2(y_n - y_0) \\ w(x_n, y_n) = c_0 + c_1(x_n - x_0) + c_2(y_n - y_0) \end{array} \right. \quad (56)$$

Estas equações podem ser reescritas na forma matricial como:

$$d + v = B\hat{c}. \quad (57)$$

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

$$\hat{c} = (B^T P_d B)^{-1} B^T P_d d, \quad (58)$$

onde:

$d$ : vetor deslocamento;

$P$ : matriz peso;

$B$ : matriz das derivadas parciais dos polinômios com relação às posições dos pontos.

Nesta etapa foi elaborado rotinas processadas no software Scilab versão 5.4.1.

### 3.5 Determinação do modelo de deformação

O modelo matemático pode ser estimado em função de um polinômio, de maneira que seus coeficientes representem os parâmetros de deformação da estrutura investigada, neste projeto, a Rede GNSS/SP na região oeste do Estado de São Paulo, conforme Kuang (1996):

$$d(x, y, z, t - t_0) = B(x, y, z, t - t_0)c, \quad (59)$$

onde:

$d$ : é o vetor de deslocamento do ponto de coordenadas  $(x, y, z)$ ;

$t_0$ : época inicial;

$t$ : época final;

$B$ : matriz das derivadas parciais dos polinômios com relação à  $x, y$  ou  $z$ ;

$c$ : corresponde ao vetor de parâmetros de deformação desconhecidos.

Na forma vetorial:

$$d(x, y, z; t - t_0) = \begin{pmatrix} u(x, y, z; t - t_0) \\ v(x, y, z; t - t_0) \\ w(x, y, z; t - t_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_u(x, y, z; t - t_0)c_u \\ B_v(x, y, z; t - t_0)c_v \\ B_w(x, y, z; t - t_0)c_w \end{pmatrix}. \quad (60)$$



Para o caso bidimensional, o deslocamento das componentes 'u' e 'v' nas direções X e Y, respectivamente, podem ser estimados por um polinômio de primeira ordem do tipo (SANTOS, 1999):

$$u = u(x, y) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0), \quad (61)$$

$$v = v(x, y) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0). \quad (62)$$

Associando as coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$  ao sistema geodésico local  $(e, n, u)$  teremos o seguinte modelo de deformação:

$$d_e = a_0 + a_1e_i + a_2n_i, \quad (63)$$

$$d_n = b_0 + b_1e_i + b_2n_i. \quad (64)$$

Estas equações relacionam os deslocamentos com as deformações e são denominadas de relações deslocamento - deformação.

## 4 EXPERIMENTOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados do processamento, ajustamento, teste de congruência e estimativa dos parâmetros de deformação da Rede Geodésica GNSS/SP.

### 4.1 Soluções geodésicas para o experimento

O processamento com o GAMIT forneceu como resultado as coordenadas e suas respectivas MVC, das estações, para cada campanha. Nas tabelas de 4 a 9 são apresentados os desvios padrão, para cada campanha.

**Tabela 4 – Desvio padrão estação SJRP**

Campanha	$\sigma_N$ (cm)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	0,81	0,58	2,56
2ª campanha	1,24	1,03	3,89
3ª campanha	1,36	1,29	5,57
4ª campanha	2,18	2,86	4,19
5ª campanha	3,42	2,97	8,62
6ª campanha	0,83	0,67	2,68
7ª campanha	1,14	1,03	4,43

**Tabela 5 - Desvio padrão estação SPAR**

Campanha	$\sigma_N$ (cm)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	0,90	0,45	2,11
2ª campanha	1,38	1,12	3,69
3ª campanha	1,52	1,12	4,01
4ª campanha	1,36	1,05	4,83
5ª campanha	1,11	0,73	3,11
6ª campanha	0,90	0,47	2,14
7ª campanha	1,66	1,53	6,23

**Tabela 6 - Desvio padrão estação ROSA**

Campanha	$\sigma_N$ (cm)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	1,40	0,67	3,07
2ª campanha	1,94	1,36	4,58
3ª campanha	2,38	1,70	5,65
4ª campanha	2,08	1,45	6,78
5ª campanha	1,69	1,09	4,57
6ª campanha	1,67	1,20	4,06
7ª campanha	1,68	1,07	4,37

**Tabela 7 - Desvio padrão estação ILHA**

Campanha	$\sigma_N$ (cm)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	1,13	0,62	2,78
2ª campanha	1,47	1,09	3,83
3ª campanha	1,24	0,74	3,39
4ª campanha	1,65	1,35	6,01
5ª campanha	1,36	0,94	4,04
6ª campanha	1,78	1,33	4,89
7ª campanha	1,25	0,81	3,50

**Tabela 8 - Desvio padrão estação OURI**

Campanha	$\sigma_N$ (cm)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	0,85	0,69	2,34
2ª campanha	1,07	0,89	3,20
3ª campanha	0,94	0,80	2,79
4ª campanha	2,23	2,35	9,71
5ª campanha	1,06	0,93	3,42
6ª campanha	1,47	1,36	3,89
7ª campanha	1,29	1,29	4,62

**Tabela 9 - Desvio padrão estação PPTE**

Campanha	$\sigma_N$ (cm)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	1,14	0,65	2,75
2ª campanha	1,87	1,40	4,65
3ª campanha	1,19	0,72	3,00
4ª campanha	1,65	1,24	5,64
5ª campanha	1,32	0,90	3,75
6ª campanha	1,17	0,66	2,83
7ª campanha	1,35	0,95	3,80

Nas tabelas de 10 a 13, o desvio padrão das coordenadas das estações utilizadas como referência no ajustamento da Rede investigada e também nos cálculos dos parâmetros de deformação.

**Tabela 10 - Desvio padrão estação BRAZ**

Campanha	$\sigma_N$ (m)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	0,47	0,92	2,01
2ª campanha	2,52	3,26	8,57
3ª campanha	0,82	1,28	3,78
4ª campanha	0,56	1,04	2,41
5ª campanha	0,50	0,96	2,15
6ª campanha	0,67	1,17	3,01
7ª campanha	0,67	1,12	3,01

Tabela 11 - Desvio padrão estação CHPI

Campanha	$\sigma_N$ (cm)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	0,59	1,48	0,35
2ª campanha	0,60	0,92	2,20
3ª campanha	0,65	0,96	2,45
4ª campanha	0,71	0,99	3,28
5ª campanha	0,42	0,71	1,90
6ª campanha	0,54	0,88	0,77
7ª campanha	0,39	1,12	2,27

Tabela 12 - Desvio padrão estação SAVO

Campanha	$\sigma_N$ (cm)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	1,35	1,59	3,46
2ª campanha	2,50	3,15	6,66
3ª campanha	1,44	1,74	3,97
4ª campanha	1,73	2,20	6,32
5ª campanha	1,52	1,88	4,49
6ª campanha	4,01	5,81	3,29
7ª campanha	1,89	2,42	7,20

Tabela 13 - Desvio padrão estação UFPR

Campanha	$\sigma_N$ (cm)	$\sigma_E$ (cm)	$\sigma_U$ (cm)
1ª campanha	0,76	1,09	2,47
2ª campanha	0,81	1,20	2,57
3ª campanha	0,80	1,13	2,58
4ª campanha	1,23	1,60	4,45
5ª campanha	0,91	1,29	3,14
6ª campanha	1,54	2,07	4,08
7ª campanha	1,43	2,01	5,31

Analisando os desvios padrão das coordenadas ajustadas pode-se dizer que as observações que contribuíram com o ajustamento apresentaram diferença para as coordenadas ajustadas, menor que 4,01 cm para a componente Norte ( $N$ ), para a componente Este ( $E$ ) 3,26 cm e 9,71 para a componente Up ( $U$ ).

Também ao analisar as precisões das campanhas, constata-se que a primeira campanha apresenta valores melhores que as demais em todas as estações analisadas.

Verificou-se que os valores obtidos são precisos e compatíveis com os resultados determinados por outros centros de processamento, apresentando discrepâncias da ordem de centímetros.

## **4.2 Cálculo dos deslocamentos das coordenadas das investigadas**

A primeira análise foi a determinação dos deslocamentos das coordenadas geodésicas locais ( $N$ ,  $E$ ,  $U$ ). Para tanto se comparou os dados da primeira campanha com as demais (2<sup>a.</sup>, 3<sup>a.</sup>, ... 7<sup>a.</sup>). Os deslocamentos foram utilizados como dados nos cálculos do TCG.

Os resultados dos deslocamentos para cada estação são apresentados nas tabelas 14 a 19. Na sequência de cada tabela, apresentam-se as figuras 8 a 13 com a dispersão dos deslocamentos em cada campanha analisada com relação à primeira, para verificação dos deslocamentos ao longo destas.

Tabela 14 – Deslocamento na estação de SJRP

Campanha Analisada	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
2ª campanha	0,00609	0,00040	0,00406
3ª campanha	0,00930	0,00434	0,00428
4ª campanha	0,01097	0,00493	0,00790
5ª campanha	0,02449	0,00762	0,00336
6ª campanha	0,03087	0,01067	0,00164
7ª campanha	0,03468	0,01096	0,01009

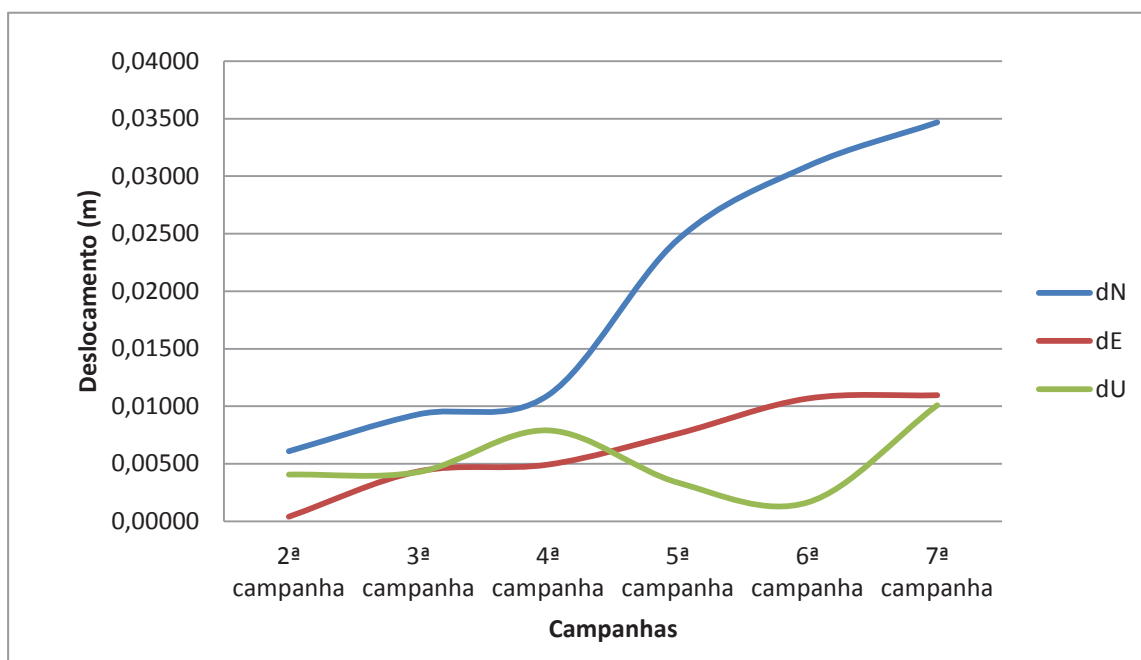


Figura 8 - Deslocamento na estação de SJRP.

Na estação de SJRP é possível perceber um maior deslocamento na componente planimétrica *N* entre as campanhas 5ª., 6ª. e 7ª. que correspondem aos anos de 2011 e 2012.

Tabela 15 - Deslocamento na estação de SPAR

Campanha Analisada	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
2ª campanha	0,00072	0,00227	0,00690
3ª campanha	0,00443	0,00151	0,00421
4ª campanha	0,00797	0,00483	0,00549
5ª campanha	0,02306	0,00811	0,00068
6ª campanha	0,02453	0,00983	0,01252
7ª campanha	0,03104	0,01407	0,00206

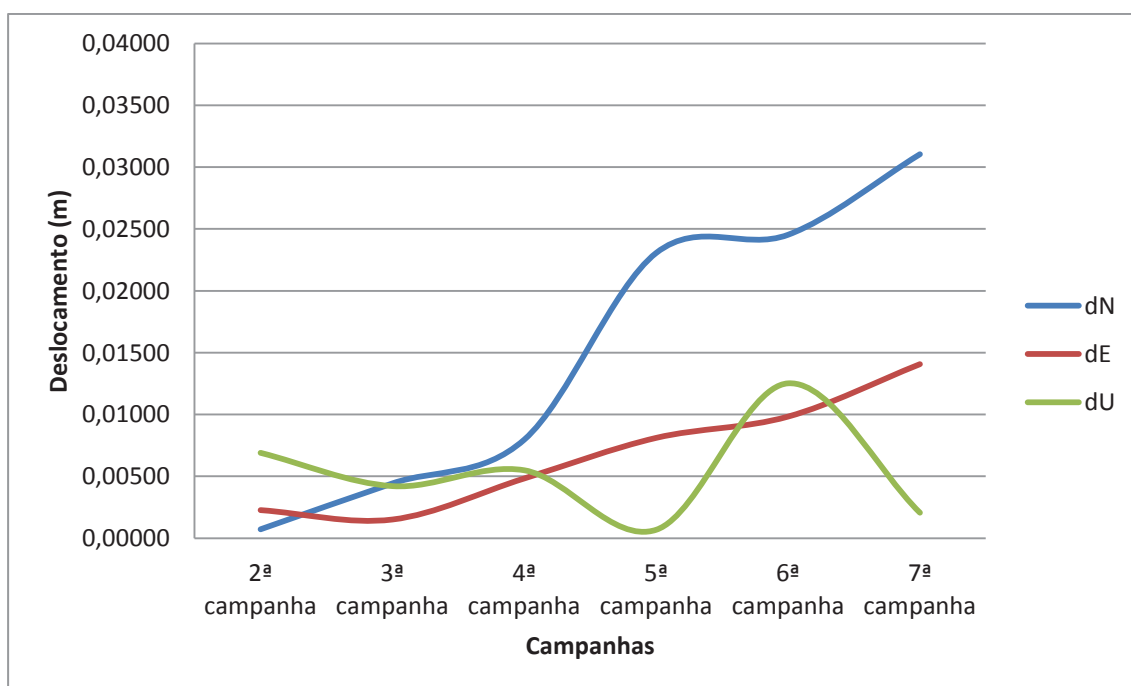


Figura 9 - Deslocamento na estação de SPAR.

Na estação de SPAR o maior deslocamento ocorre na componente planimétrica *N* principalmente entre as campanhas 4ª., 5ª., 6ª. e 7ª. que correspondem aos anos de 2011 e 2012.



Tabela 16 - Deslocamento na estação de ROSA

Campanha Analisada	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
2ª campanha	0,00591	0,00292	0,00509
3ª campanha	0,00714	0,00401	0,00217
4ª campanha	0,00985	0,00553	0,00154
5ª campanha	0,01420	0,00223	0,00478
6ª campanha	0,02470	0,00455	0,00558
7ª campanha	0,02248	0,00748	0,01255

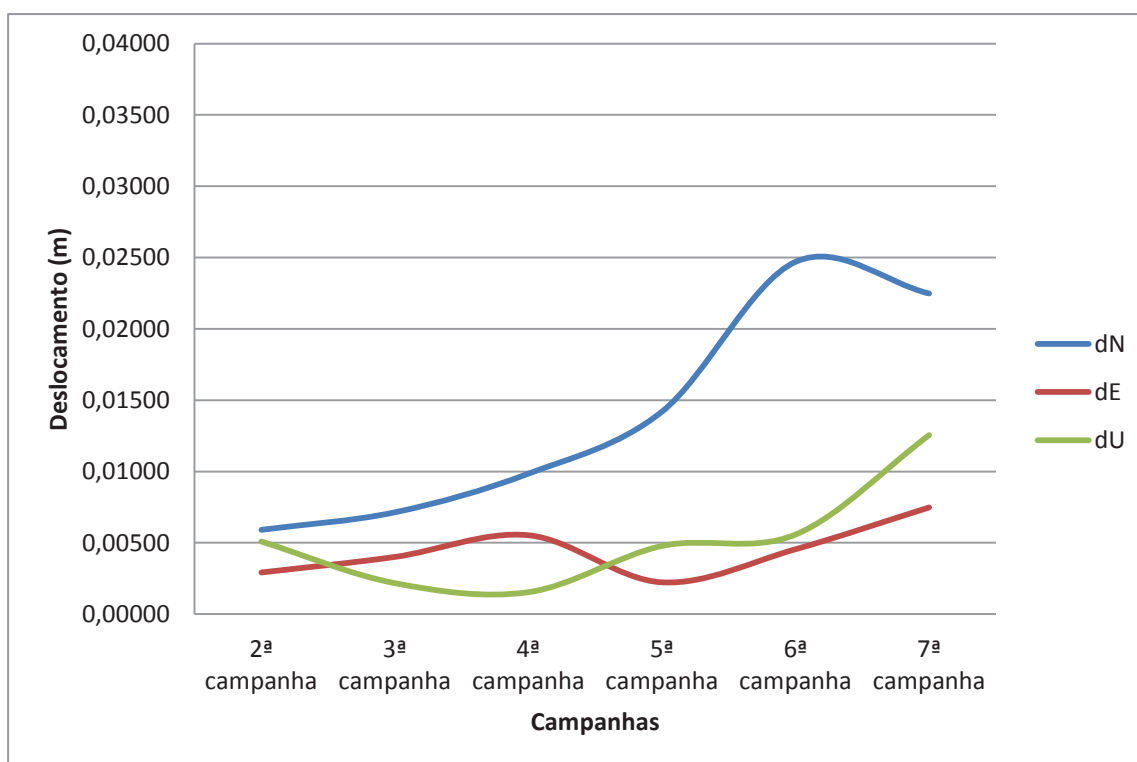


Figura 10 - Deslocamento na estação de ROSA.

Na estação de ROSA o maior deslocamento ocorre na componente planimétrica *N* principalmente entre as campanhas 6ª. e 7ª. que corresponde ao ano de 2012.

Tabela 17 - Deslocamento na estação de ILHA

Campanha Analisada	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
2ª campanha	0,00729	0,00112	0,00312
3ª campanha	0,01320	0,01213	0,00195
4ª campanha	0,01339	0,00868	0,00518
5ª campanha	0,02829	0,01232	0,00614
6ª campanha	0,03452	0,01333	0,00698
7ª campanha	0,03939	0,01509	0,01017

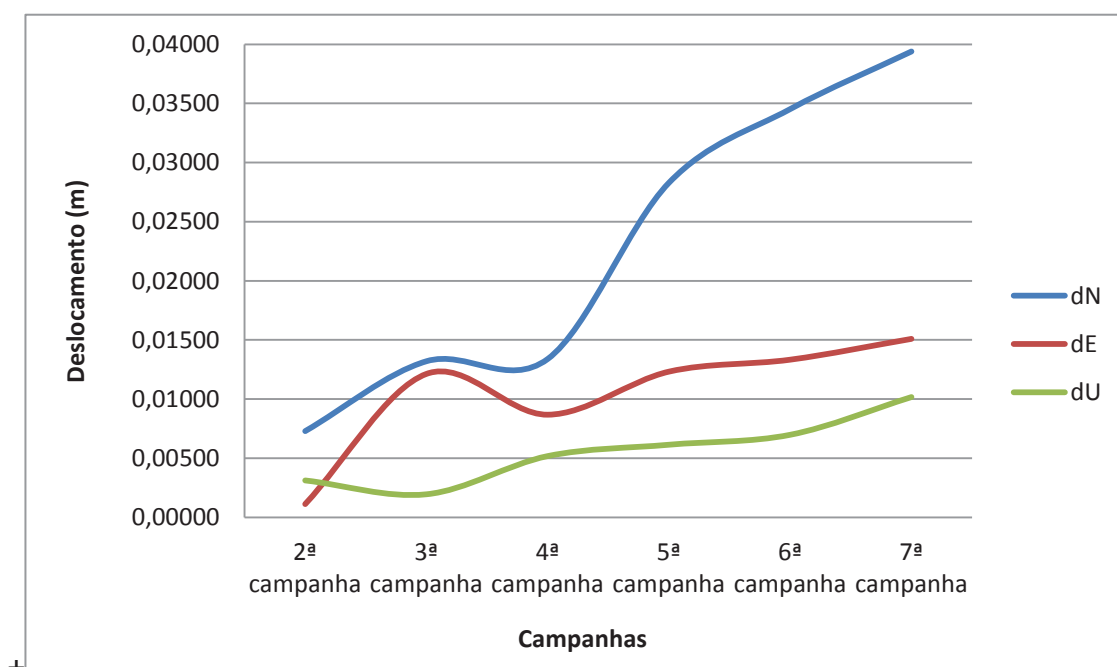


Figura 11 -- Deslocamento na estação de ILHA.

Na estação de ROSA o maior deslocamento ocorre na componente planimétrica *N* entre as campanhas 4ª., 5ª., 6ª. e 7ª. que correspondem aos anos de 2011 e 2012.

Tabela 18 - Deslocamento na estação de OURI

Campanha Analisada	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
2ª campanha	0,00461	0,00103	0,00724
3ª campanha	0,00787	0,00614	0,00178
4ª campanha	0,00981	0,00199	0,00395
5ª campanha	0,01769	0,00476	0,00563
6ª campanha	0,02575	0,00314	0,02183
7ª campanha	0,03243	0,00583	0,01740

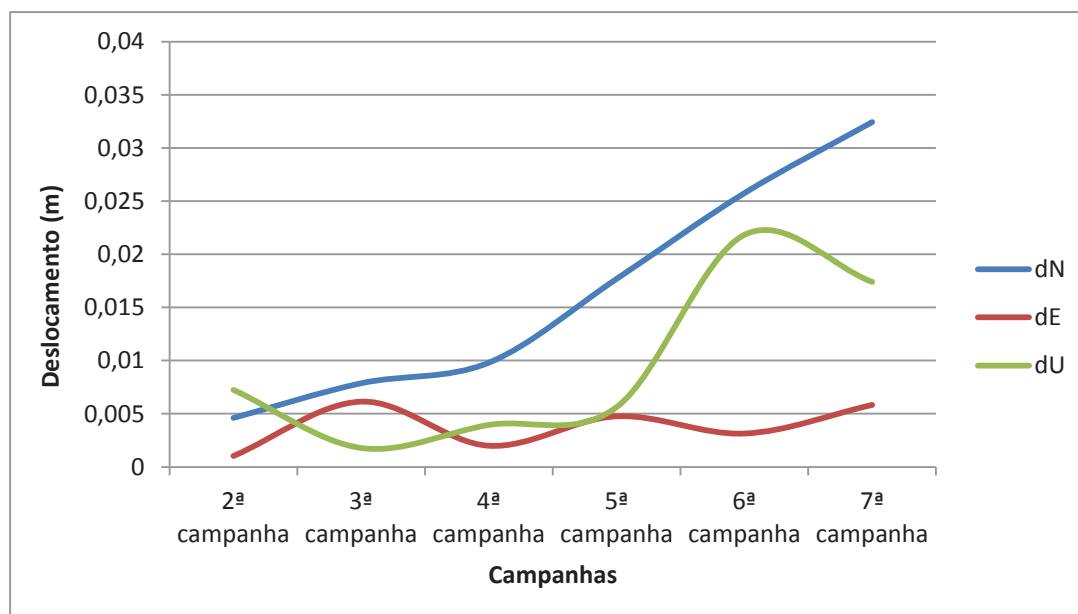


Figura 12 - Deslocamento na estação de OURI.

Na estação de OURI o maior deslocamento ocorre na componente planimétrica *N* principalmente entre as campanhas 4ª., 5ª., 6ª. e 7ª. que correspondem aos anos de 2011 e 2012.

Tabela 19 - Deslocamento na estação de PPTE

Campanha Analisada	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
2ª campanha	0,00367	0,00231	0,01083
3ª campanha	0,00693	0,00648	0,00327
4ª campanha	0,01061	0,00586	0,00225
5ª campanha	0,02301	0,00866	0,00168
6ª campanha	0,03083	0,01086	0,00374
7ª campanha	0,03415	0,01264	0,00274

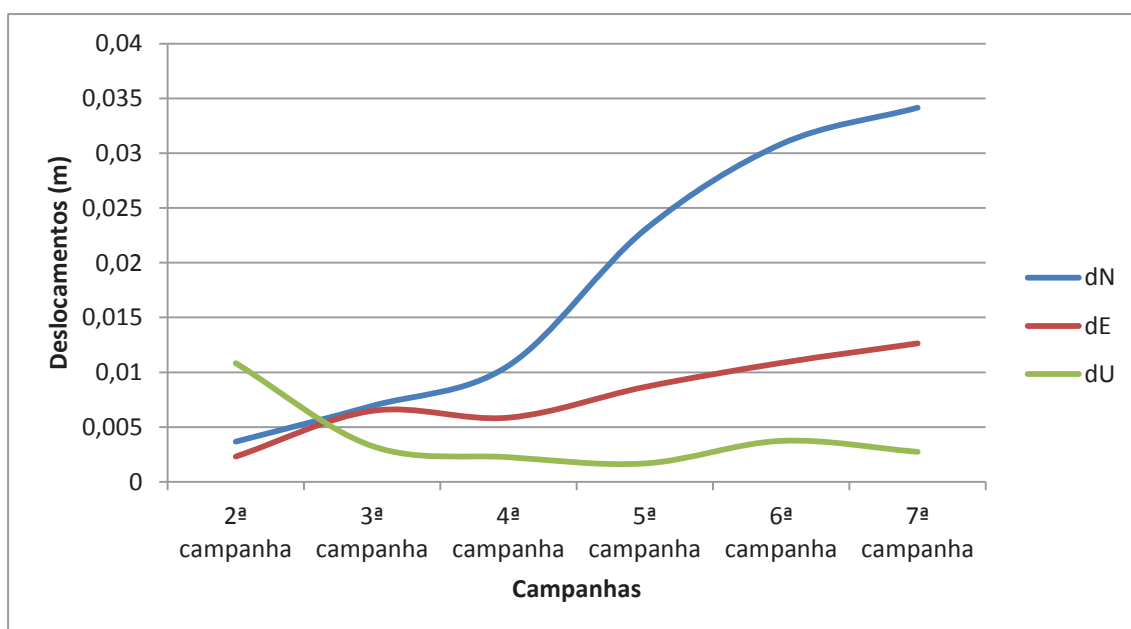


Figura 13 - Deslocamento na estação de PPTE.

Na estação de PPTE o maior deslocamento ocorre na componente planimétrica N principalmente entre as campanhas 5ª., 6ª. e 7ª. que correspondem aos anos de 2011 e 2012.

Nas tabelas de 20 a 25 são apresentados os resultados dos deslocamentos das estações em função de cada campanha, bem como as respectivas figuras de 14 a 19. Assim, é possível identificar qual estação obteve maior deslocamento em cada uma das campanhas.

Tabela 20 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 2ª.

Campanhas 1ª. – 2ª.	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
SJRP	0,00609	0,00040	0,00406
SPAR	0,00072	0,00227	0,00690
ROSA	0,00591	0,00292	0,00509
ILHA	0,00729	0,00112	0,00312
OURI	0,00461	0,00103	0,00724
PSTE	0,00367	0,00231	0,01083

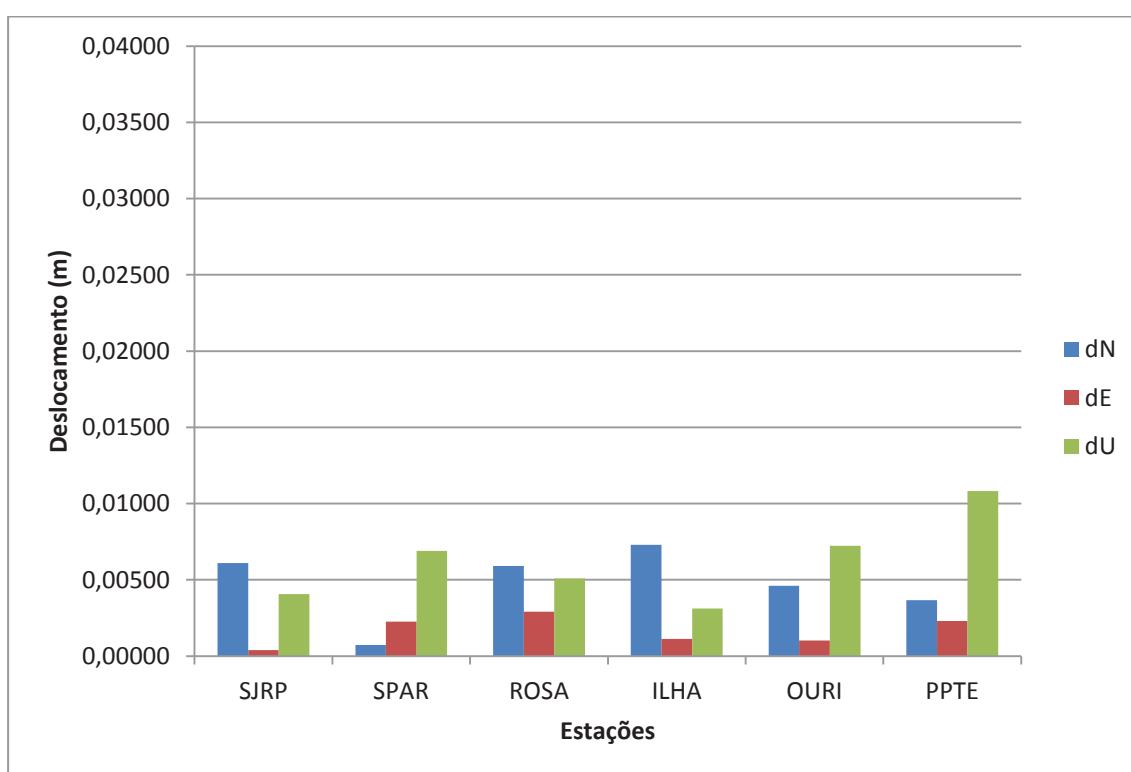


Figura 14 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1ª. e 2ª.

Entre a primeira e segunda campanha o maior deslocamento na componente planimétrica N ocorre na estação de ILHA, enquanto que a componente planimétrica E o maior deslocamento é na estação de ROSA e na componente vertical U na estação de PSTE.

Tabela 21 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 3ª.

Campanhas 1ª.- 3ª.	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
SJRP	0,00930	0,00434	0,00428
SPAR	0,00443	0,00151	0,00421
ROSA	0,00714	0,00401	0,00217
ILHA	0,01320	0,01213	0,00195
OURI	0,00787	0,00614	0,00178
PSTE	0,00693	0,00648	0,00327

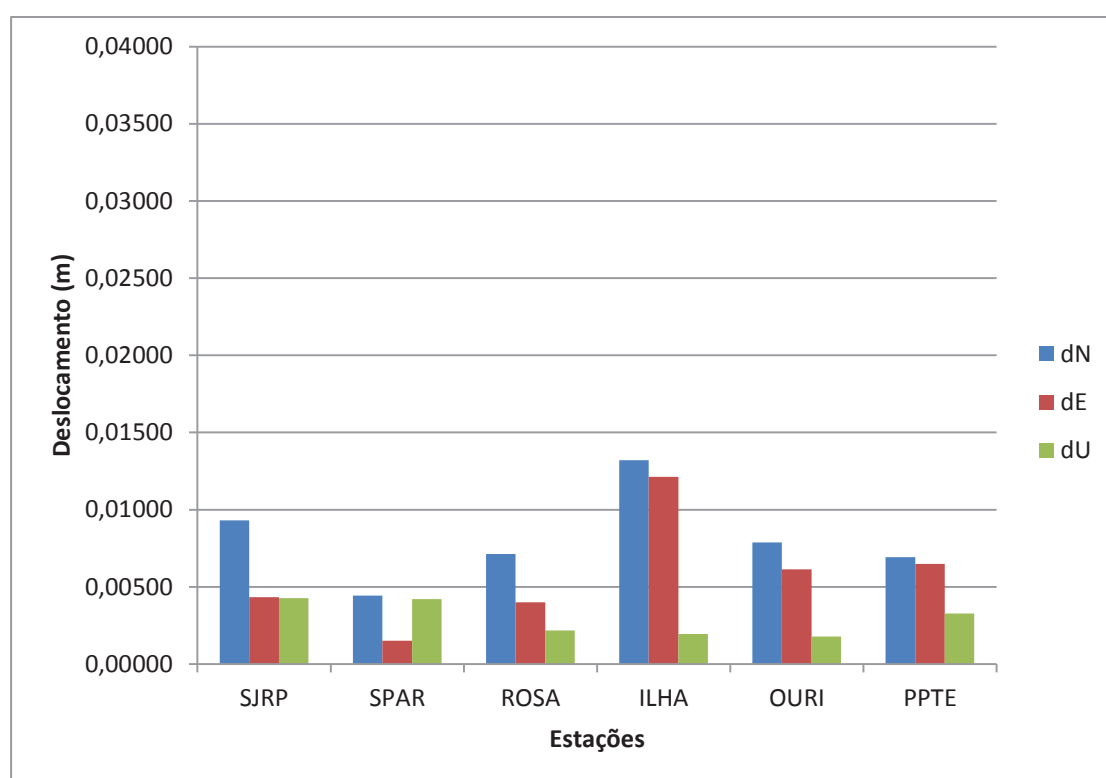
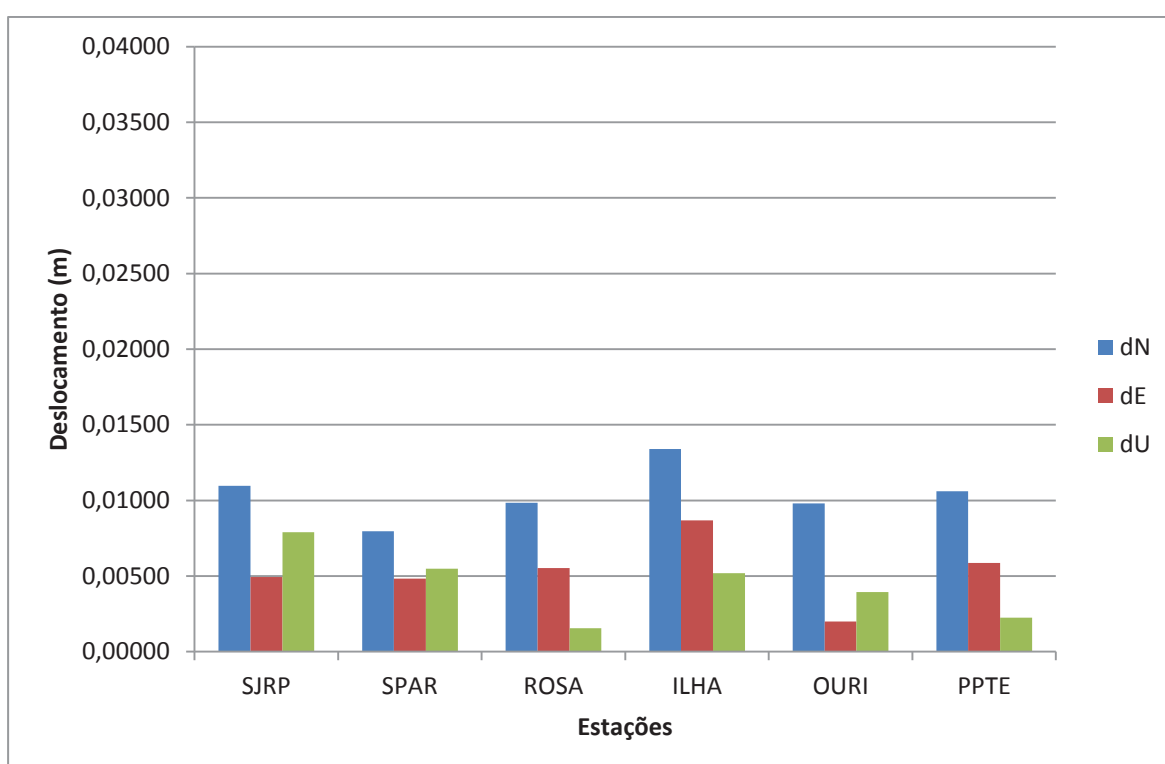


Figura 15 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1ª. e 3ª.

Entre a primeira e terceira campanhas, o maior deslocamento nas componentes planimétricas N e E ocorrem na estação de ILHA, enquanto que a componente planimétrica vertical U na estação de SJRP.

Tabela 22 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1<sup>a</sup>. e 4<sup>a</sup>.

Campanhas 1 <sup>a</sup> . – 4 <sup>a</sup> .	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
SJRP	0,01097	0,00493	0,00790
SPAR	0,00797	0,00483	0,00549
ROSA	0,00985	0,00553	0,00154
ILHA	0,01339	0,00868	0,00518
OURI	0,00981	0,00199	0,00395
PSTE	0,01061	0,00586	0,00225

Figura 16 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1<sup>a</sup>. e 4<sup>a</sup>.

Entre a primeira e quarta campanha o maior deslocamento nas componentes planimétricas N e E ocorrem na estação de ILHA, enquanto que a componente planimétrica vertical U na estação de SJRP.

Tabela 23 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 5ª.

Campanhas 1ª.- 5ª.	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
SJRP	0,02449	0,00762	0,00336
SPAR	0,02306	0,00811	0,00068
ROSA	0,01420	0,00223	0,00478
ILHA	0,02829	0,01232	0,00614
OURI	0,01769	0,00476	0,00563
PPTE	0,02301	0,00866	0,00168

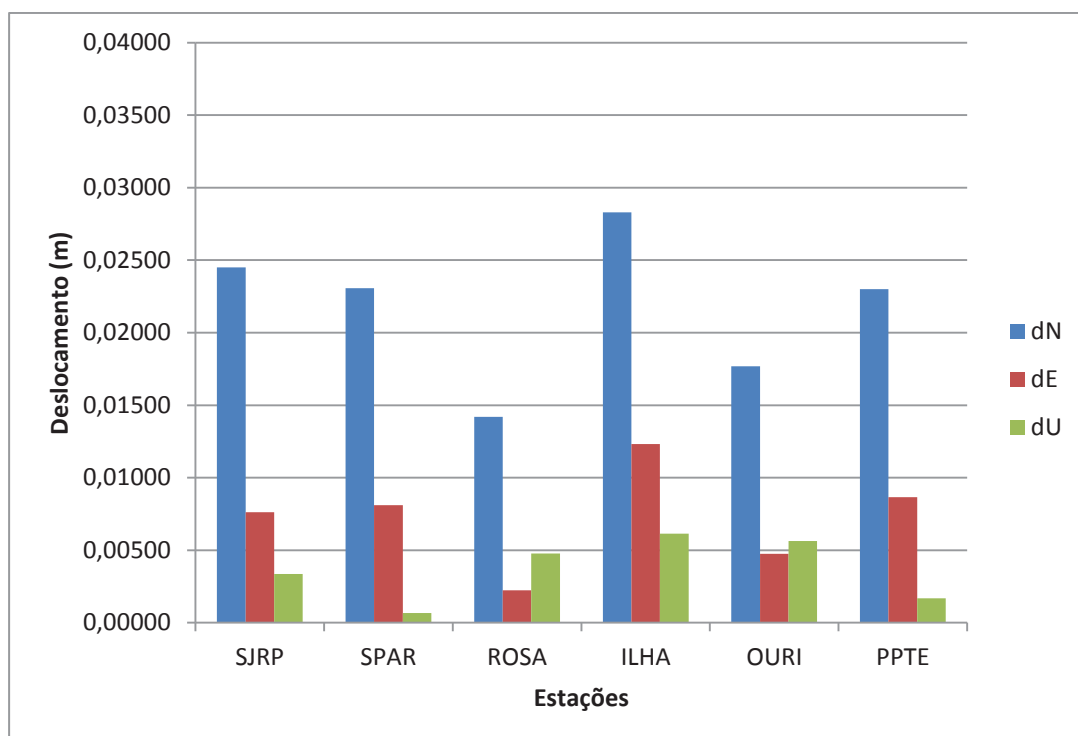


Figura 17 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1ª. e 5ª.

Entre a primeira e quinta campanha o maior deslocamento nas componentes planimétricas N e E ocorrem na estação de ILHA, o mesmo ocorre para a estação de ILHA com a componente planimétrica vertical U.



Tabela 24 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 6ª.

Campanhas 1ª. – 6ª.	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
SJRP	0,03087	0,01067	0,00164
SPAR	0,02453	0,00983	0,01252
ROSA	0,02470	0,00455	0,00558
ILHA	0,03452	0,01333	0,00698
OURI	0,02575	0,00314	0,02183
PPTE	0,03083	0,01086	0,00374

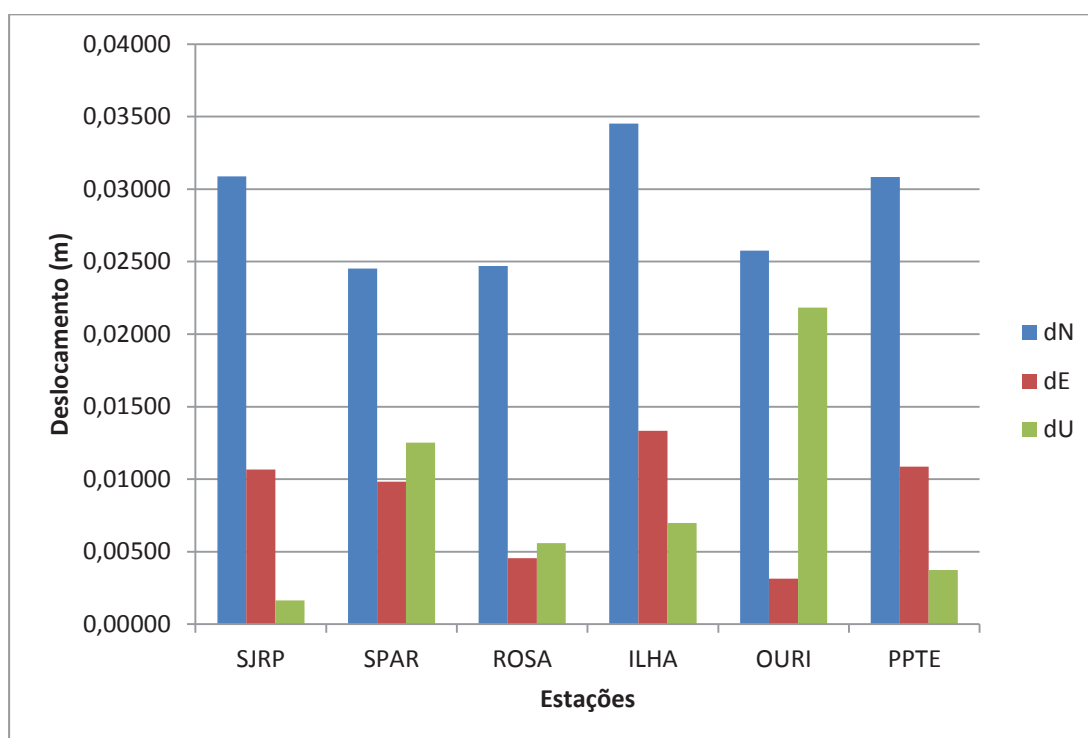


Figura 18 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1ª. e 6ª.

Entre a primeira e sexta campanha o maior deslocamento nas componentes planimétricas N e E ocorrem na estação de ILHA, enquanto que a componente planimétrica vertical U na estação de OURI.

Tabela 25 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 7ª.

Campanhas 1ª. – 8ª.	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta U$ (m)
SJRP	0,03468	0,01096	0,01009
SPAR	0,03104	0,01407	0,00206
ROSA	0,02248	0,00748	0,01255
ILHA	0,03939	0,01509	0,01017
OURI	0,03243	0,00583	0,01740
PSTE	0,03415	0,01264	0,00274

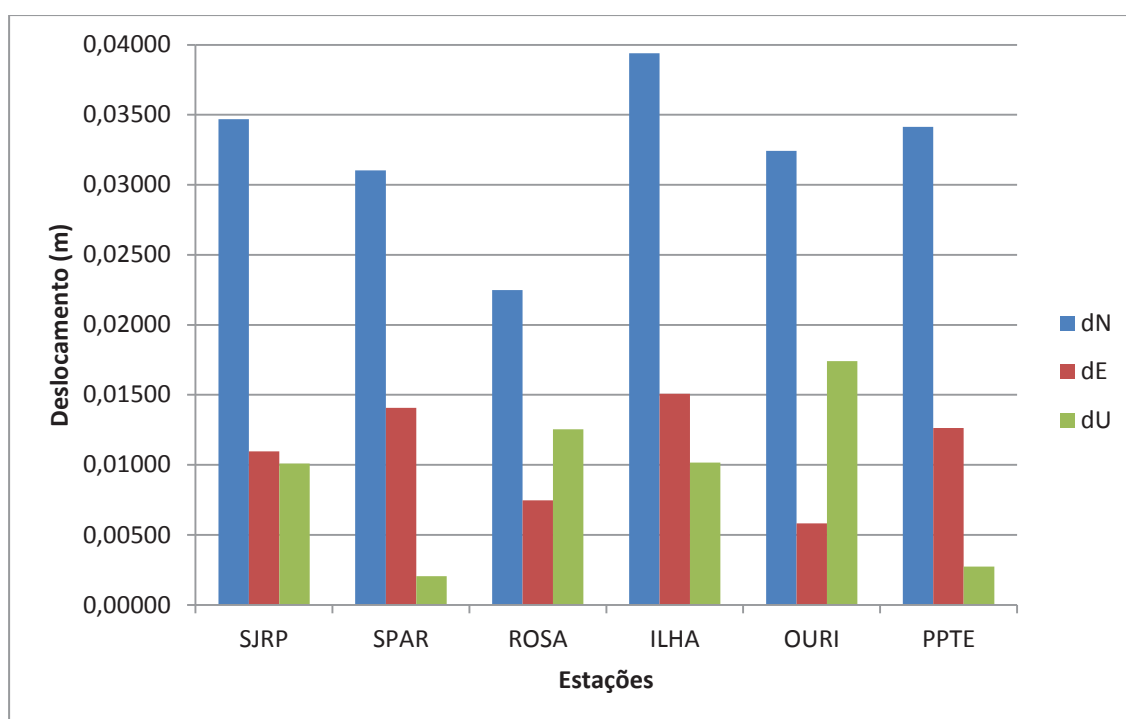
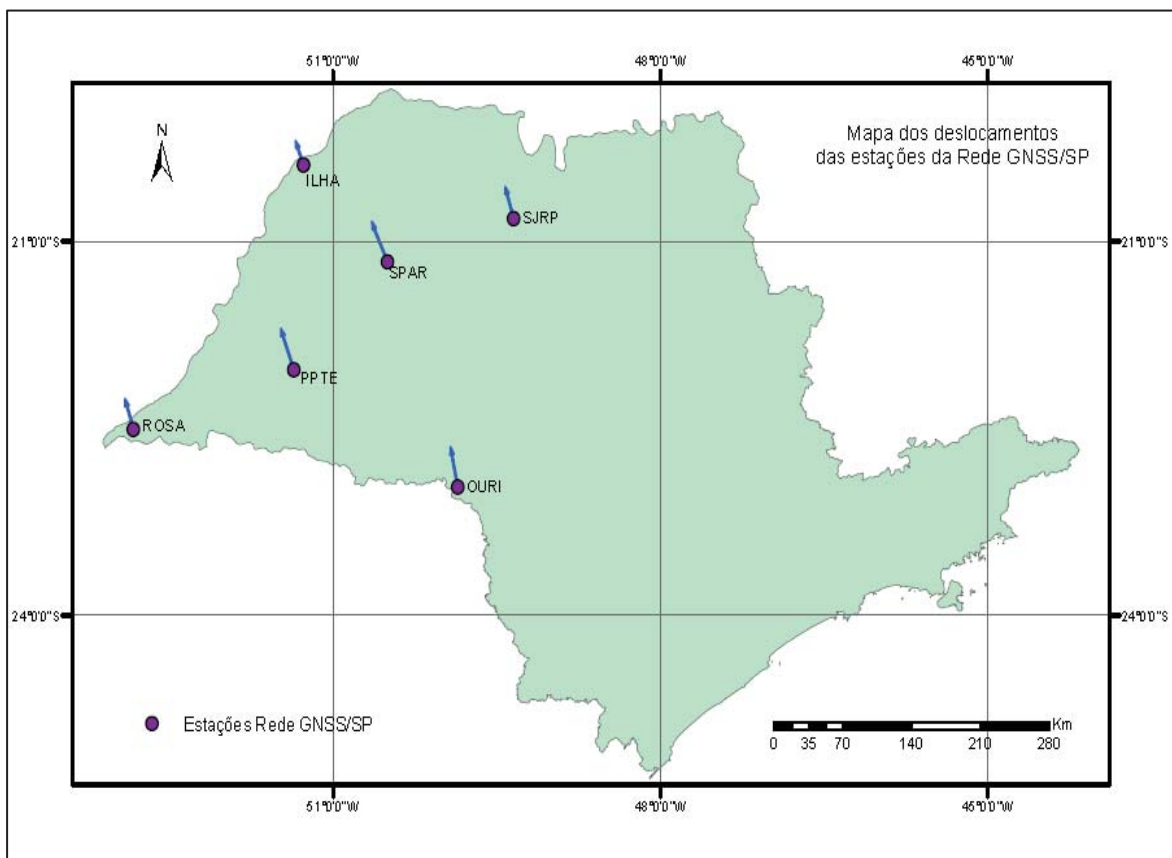


Figura 19 - Deslocamentos das estações entre as campanhas 1ª. e 7ª.

Entre a primeira e sétima campanha o maior deslocamento nas componentes planimétricas N e E ocorrem na estação de ILHA, enquanto que a componente planimétrica vertical U na estação de OURI.

Na figura 20 podem ser visualizadas as resultantes do deslocamento para cada estação da Rede GNSS/SP no período estudado.



**Figura 20 - Resultante das estações da Rede GNSS/SP.**

De modo geral, os resultados apresentados na figura 20, apontam, para uma análise visual, que as estações tiveram um deslocamento na direção noroeste. Possivelmente, isso é fruto do movimento da placa, já que é a mesma direção com que a placa Sul Americana se movimenta.

Essa tendência é verdadeira, ou é incompatibilidade entre as soluções? Para responder essa questão seria necessário realizar um maior número de campanhas bem como um maior número de dados de processamento.

### 4.3 Análise de congruência das estações pesquisadas

A aplicação do teste nas estações de referências e nas estações da Rede GNSS/SP foi feita por meio de combinação das épocas do ajustamento de duas a duas, de acordo com a tabela 3.

Foi aplicado o TCG 3D, utilizando as coordenadas (geodésica local) E, N e U e suas respectivas matrizes variância-covariância, resultante do ajustamento do processamento. Como citado no item 3.3 foi utilizado rotinas desenvolvidas no SILAB para a aplicação do TCG.

Para esse trabalho adotou-se 3 níveis de significância para aplicar os testes. Em cada nível de significância foi comparado o valor crítico de  $F_{\alpha,h,r}$  e comparado com o calculado  $F_c$ . Consideraram-se os seguintes níveis de significância  $\alpha = 0,1$  (10%),  $\alpha = 0,05$  (5%) e  $\alpha = 0,01$  (1%), com graus de liberdade correspondentes a cada ajustamento. O teste será aceito na situação onde  $F_c < F_{\alpha,h,r}$ . Lembrando que a rejeição e aceitação de  $H_0$  indicam respectivamente, possível movimento e falta do mesmo.

As tabelas 26 a 31 apresentam as combinações das épocas para as estações analisadas comparando com os valores da estatística  $F_c$  contra o valor tabelado da distribuição  $F$  a um dado nível de significância  $\alpha$ .

O objetivo do teste é confirmar a presença de deslocamento significativo nos pontos da rede GNSS/SP, bem como nos pontos da rede de referência.

Tabela 26 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 2ª.

Estação	$F_c$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
$F_{\alpha,h,r}$	-	2,08	2,60	3,78
BRAZ	1,78208	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	1,93138	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,03464	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	1,40273	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	0,91873	Aceito	Aceito	Aceito
SPAR	0,50718	Aceito	Aceito	Aceito
ROSA	1,32181	Aceito	Aceito	Aceito
ILHA	1,58095	Aceito	Aceito	Aceito
OURI	1,70482	Aceito	Aceito	Aceito
PPT	2,17693	<b>Rejeitado</b>	Aceito	Aceito

A aplicação do TCG indicou deslocamento, ou seja, movimentação nas estações que foram rejeitadas no teste. Na comparação entre a 1ª e 2ª campanha a estação de PPT apresentou movimentação ao nível de significância  $\alpha = 0,1$  sendo que foi aceita nos outros níveis de significância. As demais estações permaneceram estáveis.

Tabela 27 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 3ª.

Estação	$F_c$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
$F_{\alpha,h,r}$	-	2,08	2,60	3,78
BRAZ	0,64638	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	1,55973	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,01089	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	0,93356	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	0,74202	Aceito	Aceito	Aceito
SPAR	1,45653	Aceito	Aceito	Aceito
ROSA	2,74995	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	Aceito
ILHA	2,58095	<b>Rejeitado</b>	Aceito	Aceito
OURI	1,53407	Aceito	Aceito	Aceito
PSTE	2,69440	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	Aceito

Aplicando o teste entre a 1ª e 3ª campanha as estações de ROSA e PSTE apresentaram movimentação aos níveis de significância de  $\alpha = 0,1$  e  $\alpha = 0,05$ . Já a estação de ILHA apresentou movimentação ao nível de significância de  $\alpha = 0,1$ . As demais estações apresentaram ausência de movimentação.

Tabela 28 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 4ª.

Estação	$F_c$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,01$
$F_{\alpha,h,r}$	-	2,08	2,60	3,78
BRAZ	1,07024	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	0,90246	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,07935	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	1,78848	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	8,38152	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
SPAR	1,77939	Aceito	Aceito	Aceito
ROSA	3,57114	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	Aceito
ILHA	2,70218	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	Aceito
OURI	1,26652	Aceito	Aceito	Aceito
PPTE	2,71519	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	Aceito

Entre as campanhas 1ª e 4ª a análise apresentou indicações de deslocamento para as estações de ROSA, ILHA e PPTE aos níveis de significância de  $\alpha = 0,1$  e  $\alpha = 0,05$ . Já a estação de SJRP apresentou movimentação em todos os níveis de significância analisados. As demais estações apresentaram ausência de movimentação.

Tabela 29 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1<sup>a</sup>. e 5<sup>a</sup>.

Estação	$F_c$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,01$
$F_{\alpha,h,r}$	-	2,08	2,60	3,78
BRAZ	1,02650	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	1,52764	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,09961	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	1,88718	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	5,34445	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
SPAR	2,50183	<b>Rejeitado</b>	Aceito	Aceito
ROSA	11,20488	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
ILHA	6,065677	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
OURI	8,97233	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
PSTE	4,29034	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>

Analisando as campanhas 1<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> as estações de SJRP, ROSA, ILHA, OURI e PSTE apresentaram movimentação em todos os níveis de significância analisados. Já a estação SPAR, que permaneceu estável nas campanhas 2, 3 e 4, indicou deslocamento ao nível de significância de  $\alpha = 0,1$ . As demais estações que pertencem à rede de referência apresentaram ausência de movimentação.



Tabela 30 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 6ª.

Estação	$F_c$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,01$
$F_{\alpha,h,r}$	-	2,08	2,60	3,78
BRAZ	1,15019	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	0,79671	Aceito	Aceito	Aceito
SAVO	0,56409	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	2,04775	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	15,4532	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
SPAR	5,32737	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
ROSA	5,40547	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
ILHA	8,77973	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
OURI	7,37765	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
PPTE	9,20279	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>

Entre as campanhas 1ª e 6ª a análise apresentou indicações de deslocamento para as estações de SJRP, SPAR, ROSA, ILHA, OURI e PPTE em todos os níveis de significância analisados. As demais estações que pertencem à rede de referência apresentaram ausência de movimentação.

Tabela 31 - Resultados do deslocamento entre as campanhas 1ª. e 7ª.

Estação	$F_c$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,01$
$F_{\alpha,h,r}$	-	2,08	2,60	3,78
BRAZ	1,562497	Aceito	Aceito	Aceito
CHPI	2,26267	<b>Rejeitado</b>	Aceito	Aceito
SAVO	0,04074	Aceito	Aceito	Aceito
UFPR	1,10607	Aceito	Aceito	Aceito
SJRP	37,31060	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
SPAR	5,06212	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
ROSA	38,26468	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
ILHA	8,28725	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
OURI	5,22468	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>
PPTTE	8,72534	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>	<b>Rejeitado</b>

Finalmente entre a 1ª e 7ª campanha as estações da Rede GNSS/SP apresentaram deslocamento em todos os níveis de significância. Já para as estações utilizadas como referência no processamento e cálculo de deformação, somente a estação de CHPI apresentou movimentação ao nível de significância  $\alpha = 0,1$ . Já as outras estações da rede de referência permaneceram estáveis ao longos de todas as campanhas analisadas.

#### 4.4 Estimativas dos parâmetros e do modelo de deformação

Como descrito nos itens 2.2 e 3.4, a metodologia aplicada baseia-se na teoria da elasticidade. Assim, para a obtenção dos parâmetros de deformação foram desenvolvidas rotinas apropriadas no programa computacional Scilab, versão 5.4.1.

Os arquivos de entrada são as coordenadas planimétricas locais e saída, bem como, os arquivos que contém os códigos estão no formato texto.

Os parâmetros de deformação dos polinômios, em função das componentes  $E$  e  $N$ , para cada estação analisada nesta pesquisa, podem ser vistos nas tabelas de 32 a 37.

**Tabela 32 - Parâmetros de deformação estação SJRP**

Parâmetros	Campanhas 1 <sup>a</sup> . e 7 <sup>a</sup> .
$a_1$	$2.553 \times 10^{-8}$
$a_2$	$- 6.396 \times 10^{-8}$
$b_1$	$- 0.0000001$
$b_2$	$0.0000002$

**Tabela 33 - Parâmetros de deformação estação SPAR**

Parâmetros	Campanhas 1 <sup>a</sup> . e 7 <sup>a</sup> .
$a_1$	$3.073 \times 10^{-8}$
$a_2$	$- 4.316 \times 10^{-8}$
$b_1$	$- 6.779 \times 10^{-8}$
$b_2$	$9.522 \times 10^{-8}$

**Tabela 34 - Parâmetros de deformação estação ROSA**

Parâmetros	Campanhas 1 <sup>a</sup> . e 7 <sup>a</sup> .
$a_1$	$2.985 \times 10^{-8}$
$a_2$	$- 4.193 \times 10^{-8}$
$b_1$	$- 6.914 \times 10^{-8}$
$b_2$	$9.712 \times 10^{-8}$

**Tabela 35 - Parâmetros de deformação estação ILHA**

Parâmetros	Campanhas 1 <sup>a</sup> . e 7 <sup>a</sup> .
$a_1$	$2.995 \times 10^{-8}$
$a_2$	$- 4.165 \times 10^{-8}$
$b_1$	$- 7.740 \times 10^{-8}$
$b_2$	$0.0000001$

**Tabela 36 - Parâmetros de deformação estação OURI**

Parâmetros	Campanhas 1 <sup>a</sup> . e 7 <sup>a</sup> .
$a_1$	$1.111 \times 10^{-8}$
$a_2$	$- 1.560 \times 10^{-8}$
$b_1$	$- 6.178 \times 10^{-8}$
$b_2$	$8.678 \times 10^{-8}$

**Tabela 37 - Parâmetros de deformação estação PPTE**

Parâmetros	Campanhas 1 <sup>a</sup> . e 7 <sup>a</sup> .
$a_1$	$2.985 \times 10^{-8}$
$a_2$	$- 4.193 \times 10^{-8}$
$b_1$	$- 6.914 \times 10^{-8}$
$b_2$	$9.712 \times 10^{-8}$

Observa-se nas tabelas 32 a 37 que os valores dos parâmetros de deformação foram pequenos. Para os parâmetros lineares ( $a_1$  e  $b_2$ ), as estações de ILHA e SPAR tiveram maiores variações. Em relação aos parâmetros angulares ( $a_2$  e  $b_1$ ), ainda nas tabelas 32 a 37, as estações SJRP e ILHA apresentaram as maiores variações; já as estações OURI, PPTE e ROSA apresentaram variações menores entre os coeficientes.

Um das possíveis explicações para as variações encontradas entre as estações da Rede GNSS/SP tanto para o caso linear e para o caso angular, é a presença de uma falha geológica no oeste do estado de São Paulo que pode ter influenciado na variação. A figura 21 mostra as principais falhas geológicas no Brasil e a sobreposição com a área compreendida pelas estações.



Figura 21 - Principais falhas geológicas no território brasileiro.  
Fonte: Apolo11 (2011).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As técnicas de posicionamento geodésico vêm mostrando grande potencial em atividade de análise de deformação, já que esta permite a determinação dos deslocamentos e posteriormente o cálculo da deformação da estrutura investigada, auxiliando o entendimento do comportamento geodinâmico da superfície terrestre.

Os programas Gamit e Globk como ferramenta de processamento permitiram estimar a posição das estações da Rede GNSS/SP, de onde se obtém as diversas bases, as coordenadas e sua Matriz Variância – Covariância (MVC). Assim, foi possível estudar uma estratégia de processamento mais adequada, baseado nos centros de processamento do SIRGAS, minimizando alguns fatores que viessem a afetar o resultado final do experimento.

O desenvolvimento de scripts para a automatização do processo foi de grande importância, devido à quantidade de dados processados já que o download de dados manualmente tomaria muito tempo e poderia comprometer o desenvolvimento das outras atividades propostas no trabalho.

Com a quantidade de dados utilizados neste trabalho, obteve-se o desvio padrão de cada coordenada dos pontos da Rede GNSS/SP conforme tabelas de 4 a 9. Foi possível perceber que os parâmetros estimados e a MVC dos mesmos apresentaram bons resultados, já que os desvios padrão apresentados possuem valores pequenos, e com a análise no arquivo `sh_gamit*.summary` que fornecem dados dos processamentos diários apresentou erro médio quadrático aceitável, bem como soluções das ambiguidades.

O objetivo principal do trabalho foi atingido, pois foram estimadas as coordenadas e a MVC das estações da Rede GNSS/SP analisadas. Com base nesses dados foram determinados os deslocamentos e aplicado o Teste de Congruência Global (TCG). Verificado a estabilidade das estações de referência e a provável movimentação nas estações da rede GNSS/SP foram

estimados os parâmetros de deformação com base nos fundamentos da teoria da elasticidade.

A análise dos resultados do TCG indicou possíveis deslocamento nas estações analisadas. A indicação dos pontos que sofreram movimentos entre as campanhas foram os seguintes:

- Entre as campanhas 1 e 2:
  - PPTE;
- Entre as campanhas 1 e 3:
  - PPTE;
  - ROSA;
  - ILHA;
- Entre as campanhas 1 e 4:
  - PPTE;
  - ROSA;
  - ILHA;
  - SJRP;
- Entre as campanhas 1 e 5:
  - PPTE;
  - ROSA;
  - ILHA;
  - SJRP;
  - SPAR;
  - OURI;
- Entre as campanhas 1 e 6:
  - PPTE;
  - ROSA;
  - ILHA;
  - SJRP;
  - SPAR;
  - OURI;
- Entre as campanhas 1 e 7:

- PPTTE;
- ROSA;
- ILHA;
- SJRP;
- SPAR;
- OURI;

Analisando todos os resultados, percebe-se que quanto mais próximos os valores do deslocamento e às respectivas MVC, o TCG indica aceitável para todos os níveis de  $\alpha$ . Porém, à medida que esses valores se distanciam o TCG indica rejeição.

Os deslocamentos das estações tiveram uma mesma direção pra o Norte, indicando uma tendência para essa direção. Isso porque a movimentação da placa Sul Americana apresenta esse mesmo tipo de movimentação.

Os valores dos parâmetros de deformação para cada uma das estações estudadas foram estimados e com isso pode ser utilizado como complementação de estudos tectônicos intraplaca.

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



## REFERÊNCIAS

ALLEN, P. A.; ALLEN, J. R., 2005. **Basin analysis: principles and applications**. 2nd ed. Oxford: Blackwell Science Ltd.

BAARDA, W., 1968. **A testing procedure for use in geodetic networks**. Netherlands Geodetic Commission – Publication on Geodesy – News Series, V.2, n.5.

BIESSY G., MOREAU F., DAUTEUIL O., BOUR O., 2011. **Surface deformation of an intraplate area from GPS time series**. Journal of Geodynamics, Vol. 52.

BOMFORD, G., 1980. **Geodesy**. 4th ed. Oxford: Clarendon Press.

BORRE, K., 2006. **Mathematical Foundation of Geodesy**. Springer.

CABRAL, J. J. S. P., SANTOS, S. M., PONTES FILHO, I. D. S. P., 2006. Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 11, No. 3, p. 147-157.

CALAI E., HAN J.Y., DEMETS C., NOCQUET J.M., 2006. **Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements**. Journal of Geophysics, Vol. 111, B06402, doi: 10.1029/2005JB004253.

CALDAS, F. L.; PILLOTTO, R. L., 2011. **Estimativa de deformação da crosta terrestre na região oeste do estado de São Paulo com base em dados GNSS**. Trabalho de Graduação. Curso de Engenharia Cartográfica, Presidente Prudente.

CASPARY, W. F., 1987. **Concepts of Network and Deformation Analysis**, 1st ed., School of Surveying, The University of New South Wales, Kensington, N.S.W.,

CASPARY, W. F., 2000. **Concepts of Network end Deformation Analysis**. Edited by J.M. Rueger. School of Geomatic Engineering, University of New South Wales.

CHAVES, J. C., 1994. **Controle de Deformações em Barragens: Métodos de Monitoramento e Viabilidade de Utilização do GPS**. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, São Paulo.

CHAVES, J. C., 2001. **Uso da Tecnologia GPS na Monitoração de Deformações: Sistemas, Etapas e Experimentos**. Tese de Doutorado. Curso de Transportes, São Carlos.

CHEN, Y. Q., 1983. **Analysis of Deformation Surveys, a Generalized Method**. Technical Report 94., Fredericton: Ed. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada.

CHEN, Y. Q., CHRZANOWSKI, A., SECORD, J. M., 1990. **A strategy for the analysis of the stability of reference points in deformation surveys**, CISM JOURNAL ACSGC, V.44, n. 2, pp. 141-149.

CHRZANOWSKI, A., 1986. **Geotechnical and other non-geodetic method in deformation measurement**. In: Proceedings of the Deformation Measurement Workshop. Oct 31 - Nov 1, Ed: Yehuda Bock, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

CHRZANOWSKI, A.; CHEN, Y., 1986. **Report on the Ad Hoc Committee on the Analysis of Deformation Surveys**. In: FIG INTERNATIONAL FEDERATION OF SURVEYORS, XVIII CONGRESS, Commission 6, Engineering Surveys, Toronto, Canada.

COSTA, S. M. A.; SILVA, A. L.; VAZ, J. A., 2009. **Avaliação do processamento da rede SIRGAS-CON pelo centro de análises IBGE**. Presented at the XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Mendoza, Argentina.

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

FAZAN, J. A., 2010. **Aplicação do teste de congruência global e análise geométrica para detecção de deslocamentos em redes geodésicas: estudo de caso na UHE de Itaipu.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de transportes, São Paulo.

FEATHERSTONE, W E, PENNA, N T, LEONARD, M, CLARK, D, DAWSON, J, DENTITH, M C, DARBY, D & MCCARTHY, D., 2003. **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.

FUNG, Y.C., 1994. **A first course in continuum mechanics for Physical and Biological Engineers and Scientists.** Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

GEMAEL, C., 1994. **Introdução ao Ajustamento de Observações.** Editora UFPR, Curitiba.

HALIM, S., SINGH, R., 2001. **Deformation analysis of a geodetic monitoring network.** *Geomatica*, V. 55, n. 3, pp. 333-346.

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

HILL, C. D.; SIPPEL, K. D., 2002. **Modern Deformation Monitoring: A Multi Sensor Approach.** FIG XXII International Congress, Washington DC, USA.

KUANG, S., 1996. **Geodetic Network Analysis and Optimal Design: concepts and applications.** Chelsea: Ann Arbor Press.

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

MASON, B. MOORE, C. B., 1982. **Principles of Geochemistry.** John Wiley & Sons, New York.

MONICO, J. F. G., 2008. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações.** 2.ed. UNESP, São Paulo.

MOREAU, F., DAUTEUIL, O., BOUR, O., GAVRILENKO, 2006. P. **GPS measurements of ground deformation induced by water level variations into a granitic aquifer (French Brittany)**. Terra Nova.

PEREZ, J. A. S., 2002. **Campo de velocidade para as estações da RBMC e do IGS localizadas na placa Sul-Americana: Estimativa a partir do processamento de dados GPS**. Dissertação de mestrado em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente.

RIBEIRO, F. C. D., 2008. **Proposta de metodologia para verificação da estabilidade dos pilares de rede para monitoramento geodésico de barragens: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia e Transportes, São Paulo.

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

SÁ, N. C.; SOUZA, S. F.; VIEIRA, C. D., 2001. **Monitoração tectônica na província Tocantins usando GPS: resultados preliminares**. In: XX Congresso Brasileiro de Cartografia – CBC.

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

SCHNEIDER, D., 1982. **Complex crustal strain approximation**, Department of Surveying, Engineering Technical Report No. 117, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada.

SECORD, J., 1985. **Implementation of a Generalized Method**, Department of Surveying Engineering, Technical Report N. 117, University Of New Brunswick, Canada.

SEEBER, G., 2003. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. New York: Walter de Gruyter.

SILVA, A. L.; COSTA, S. M. A.; VAZ, J. A., 2010. **Deslocamento das estações SIRGAS - CON em função do terremoto ocorrido no Chile - uma abordagem do centro de processamento SIRGAS – IBGE**. Presented at the III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife.

SOTO, J. C. B., 2006. **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.

STRANG, G., 1997. **Linear algebra, geodesy, and GPS**. Cambridge, Wellesley.

SUMMERFIELD, M. A., 1991. **Global geomorphology: an introduction to the study of landforms**. London: Longman; New York: Wiley.

TEIXEIRA, N. N., 2005. **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.

TEUNISSEN, P. J. G., 1998. **Quality Control and GPS**. In: Teunissen, P. J. G.; Kleusberg, A. *GPS for Geodesy*. 2nd.ed.: Springer Verlag.

THAPA, K., 1980. **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.

WELSCH, W. M.; HEUNECKE, O., 2001. **Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations**. In: 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements. Orange, California, USA.

TIMOSHENKO, S.P.; GOODIER, J.N., 1980. **Teoria da elasticidade**. 3ª edição, Ed. Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro.

TORGE, W., 2001. **Geodesy**. Berlin, Walter Gruyter.

TUCCI, C. E. M.; CABRAL, J. J. S. P., 2003. **Qualidade da água subterrânea**. Porto Alegre: IPH/UFRGS; Recife: CT/UFPE.

VALLIAPPAN, S., 1981. **Continuum Mechanics Fundamentals**. A. A. Balkema, Rotterdam.

VANICEK, P.; KRAKIWSKY, E. J., 1986. **Geodesy: The Concepts**. Second edition. North – Holland Publishing Company.

ZEILIK M.; GREGORY S. A., 1998. **Introductory Astronomy & Astrophysics**. Saunders College Publishing, USA.

## APÊNDICE A

### Trecho do arquivo Glorg

```
Globk Analysis

+++++
+ GLORG          Version 5.17 +
+++++

Stabilization with 20.0% constant, 80.0% site dependent weighting.
Delete sites with 3.0-sigma condition.
Height variance factor 10.00 Position, 10.00 Velocity
For Position: Min dH sigma 0.0050 m; Min RMS 0.0030 m, Min dNE sigma 0.00050 m
For Velocity: Min dH sigma 0.0050 m/yr; Min RMS 0.0030 m/yr, Min dNE sigma 0.00010 m/yr
Sigma Ratio to allow use: Position 3.00 Velocity 3.00

=====
Starting Position stabilization iteration 1 L1001011200_expt.glx
For 4 sites in origin, min/max height sigma 80.16 | 81.58 mm; Median 80.86 mm, Tol 15.00 mm
L1001011200_expt.glx

Position system stabilization results
-----
X Translation (m) 0.01894 +- 0.00150 Iter 1 L1001011200_expt.glx
Y Translation (m) -0.01986 +- 0.00150 Iter 1 L1001011200_expt.glx
Z Translation (m) -0.04386 +- 0.00102 Iter 1 L1001011200_expt.glx
Condition Sigmas used 0.0000 0.0000 0.0000
```

## APÊNDICE B

### Teste de Congruência Global

```

#Ponto a ser testado: PPTE
#Primeira epoca
      Xi= (-2462376.40192; 31823995.24789; 431.03476);
#Segunda epoca:
      Xj= (-2462376.39825; 31823995.24558; 431.02393);

#MVC primeira epoca:
      Ci= (0.00000350 -0.27010000  0.4104000
          -0.27010000  0.00000196 -0.1559000
           0.41040000 -0.15590000  0.0000216);
#MVC segunda epoca:
      Cj= (0.00000130 0.38770000  0.27190000
          0.38770000 0.00000042  0.03520000
          0.27190000 0.03520000  0.00000756);

h=3;

d=Xj-Xi;
Cd=Ci+Cj;
O=d*(inv(Cd))*d;
ri=774700.00;
rj=866591.00;
si=0.00002708;
sj=0.00000928;
S=ri*si+rj*sj;
T=(O/h)/S

```