RÉGIS FERNANDES BUENO

**MONITORAÇÃO, POR GPS, DE DESLOCAMENTOS EM ESTRUTURAS
COM CARGA DINÂMICA.**

Tese apresentada a Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de doutor em Engenharia.

São Paulo
2007

RÉGIS FERNANDES BUENO

**MONITORAÇÃO, POR GPS, DE DESLOCAMENTOS EM ESTRUTURAS
COM CARGA DINÂMICA.**

Tese apresentada a Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de doutor em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Titular
Denizar Blitzkow
Co-orientador: Prof. Livre-Docente
Nicola Paciléo Netto

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência do seu orientador.
São Paulo, 20 julho de 2007.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Bueno, Régis Fernandes

Monitoração, por GPS, de deslocamentos em estruturas com carga dinâmica / R.F. Bueno. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007. 212 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Agrimensura 2.Cartografia 3.Geodésia 4.Sistema de posicionamento global 5.Estruturas 6.Redes geodésicas 7.Ondaletas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

À minha família.

À Ana Paula, minha esposa, Ana Luiza e Julia, minhas filhas, pelos momentos felizes de convívio que vos privei e pela compreensão e carinho que me proporcionaram. Aos meus pais, Osmar e Dinah, pelo empenho na educação de seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Denizar Blitzkow, por sua amizade e orientação, seus esforços e críticas justas e pertinentes, que muito contribuíram para moldar este trabalho.

Ao Professor Dr. Nicola Pacileo Netto, pela amizade e co-orientação deste trabalho, constantes incentivos e incessante colaboração durante este longo caminho.

Ao Professor Dr. Carlos Mazzilli pela ajuda, acompanhamento e discussões que muito contribuíram com este trabalho.

Ao Professor Dr. Pedro Afonso de Oliveira Almeida pelos incentivos, análises e várias colaborações para com esta pesquisa.

Ao Professor Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Júnior e Maria Antonieta Rubião Rito de Freitas, pela amizade, colaborações e revisões deste trabalho.

Ao Prof. Dr. João Francisco Galera Mônico pelas contribuições com o a aquisição e processamento das observações, críticas, sugestões para com este trabalho e por sua dedicação enquanto processávamos os dados em P. Prudente.

Professor Dr. Jorge Pimentel Cintra pela amizade e ajuda desde os primeiros passos nesta Escola.

Ao Dr. José Fernando de Souza Rodrigues por suas colaborações nos ensaios, nas análises, incentivos e sugestões.

Aos colegas de pós graduação: Ana Cristina Oliveira Cancorro de Matos, Ilce Oliveira Campos, Jorge Luiz Alves Trabanco, José Carlos Penna de Vasconcellos, Marcelo Antonio Nero e Rosangela Leal Santos; pela amizade, companheirismo e toda a ajuda dispensada nos trabalhos desta pesquisa.

Ao Professor Gerard Lachapelle da Universidade de New Brunswick, Canadá, pelo empréstimo dos equipamentos e re-processamento das observações do primeiro experimento no VA 19.

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais da EPUSP, pela colaboração nos ensaios realizados para esta tese.

Às empresas Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projetos pela sua colaboração e informações sobre o VA-19.

À concessionária Ecovias dos Imigrantes por suas contribuições viabilizando o sítio do experimento e apoio recebido durante este trabalho.

À empresa LSE pelo fornecimento gratuito de ensaio com os acelerômetros e extensômetros, bem como modelagem por elementos do VA-19.

Ao Departamento de Geodésias do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE pela colaboração no último ensaio e empréstimo de equipamentos.

Ao Dr. Luiz Paulo Souto Fortes pelas colaborações e sugestões.

Às empresas Base Aerofotogrametria e Projetos, pelo fornecimento de receptores no primeiro ensaio.

Às empresas Santiago e Cintra e Topcon por toda colaboração prestada no segundo ensaio do VA-19.

Ao Dr. Carlos Augusto de Sampaio França, do Instituto Oceanográfico da USP pela colaboração nas análises de séries temporais.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes pela presteza no atendimento e amizade nestes anos de Poli.

A todos os demais professores das disciplinas cursadas nestes anos de pós-graduação na EPUSP.

Às funcionárias da Biblioteca da Engenharia civil, Maria de Fátima da Silva Paiva e Silvia Regina Saran Della Torre pela preparação da ficha catalográfica.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito deste trabalho.

RESUMO

A monitoração dinâmica de pontes rodoviárias através da determinação de deslocamentos espaciais é uma das atuais áreas de interesse da geodésia.

A tecnologia de posicionamento por satélite é uma das ferramentas disponíveis para este fim e foi avaliada nesta pesquisa. Verifica-se que o GNSS pode contribuir para com o monitoramento dinâmico de estruturas e nos últimos anos se observam aplicações em grandes pontes estaiadas na Ásia, na Europa e na América do Norte.

No presente estudo analisou-se a aplicação desta tecnologia em uma estrutura mais rígida, sob vínculo com uma rede de referência única e sob as condições apresentadas pela região brasileira.

Foram realizados ensaios em um shaker, na Base de Calibração de Instrumentos Geodésicos da USP e na estrutura do Viaduto Ascendente 19 da rodovia dos Imigrantes, empregando-se a tecnologia GPS e análise modal.

A partir de determinações no método relativo cinemático obtiveram-se os deslocamentos tridimensionais e a frequências do primeiro modo de vibração da estrutura. A metodologia aplicada e os resultados obtidos demonstram a potencialidade do método também para estruturas mais rígidas e sob condições características da região brasileira, que diferem de outras partes do globo no que tange a tecnologia GPS. Ao final é sugerida uma Proposta Básica de Metodologia para a Monitoração de Estrutura com Carga Dinâmica pela Utilização de GNSS.

PALAVRAS-CHAVES: Agrimensura; Cartografia; Geodésia; Sistema de Posicionamento Global; Estruturas; Redes Geodésicas.

ABSTRACT

The dynamic monitoring of road bridges through spatial displacements is one of the geodetic areas of interests.

The satellite positioning technologies are one of the disposed tools for this task and were evaluated by present research. One verifies that GNSS can contribute for the dynamic monitoring of structures, and has been applied for this task in the last years to large cable stayed bridges on Asia, on Europe and on North America.

On the present study, one analyses the use of this technology in a more rigid structure, tied to a unique reference network and under Brazilian region conditions.

Were realized essays over a shaker on USP Geodetic Instrumental Calibration Base and over the Imigrantes Roadway Ascending Viaduct 19 employing the GPS technology and modal analysis.

By determinations in the kinematics relative method one obtains the tridimensional displacements and the frequency of first modal shape of the structure. The applied methodology and its obtained results demonstrate the potentiality of this method for more rigid structure too, and under Brazilian region characteristics. At the end is proposed a Methodological Basic Proposal for Dynamic Charged Structure Monitoring through GNSS Employment.

KEYWORD: Surveying; Cartography; Geodesy; global Positioning System; Structures; Geodetic Network.

SUMÁRIO

Dedicatória	
Agradecimentos	
Resumo	
Abstract	
Sumário	
Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
Lista de Abreviaturas	
1 Introdução	1
1.1 justificativa.	2
1.2 A tecnologia de posicionamento por satélite na monitoração de obras de engenharia – estado da arte	3
1.3 Objetivos desta pesquisa	6
2 Método de Posicionamento por Satélite.....	9
2.1 Introdução	9
2.2 Sistemas de posicionamento por satélite	10
2.2.1 GPS	10
2.2.2 GLONASS	11
2.2.3 Galileo	13
2.3 Fontes de erros nas observações	16
2.3.1 Geometria satélite receptor, fator DOP	20
2.3.2 Efeitos provocados pela atmosfera	23
2.3.2.1 Conceitos sobre ondas eletromagnéticas	24
2.3.2.2 Dispersão, velocidade de fase e velocidade de grupo	29
2.3.2.3 Domínios das frequências	31
2.3.2.4 Propagação dos sinais na ionosfera e na troposfera	34
2.3.2.5 Troposfera	35
2.3.2.6 Comportamento da Ionosfera	39
2.3.2.7 Efeitos ionosféricos sobre os sinais	43
2.3.3 Reflexão, difração e interferência dos sinais	47
2.4 Classificação do posicionamento relativo	53
2.4.1 Posicionamento Relativo Cinemático	54
2.4.1.1 Introdução	54
2.4.1.2 Cinemático	56
3 Identificação de estruturas pela análise modal.....	63
3.1 Ações	63
3.2 Comportamento reológico dos materiais	65
3.3 Sistemas dinâmicos.....	65
3.4 Elementos a serem considerados em projetos de monitoração de deslocamentos	72
3.5 Análise dos deslocamentos	73
3.5.1 Ondaletas	74
3.5.2 Filtros	79
3.6 Matrizes de rotação	80
3.7 Transformação entre sistemas	83

4	Metodologia de Redes de Monitoração	86
4.1	Introdução	86
4.2	Aspectos gerais de projetos para monitoração de deslocamentos em estruturas	89
4.2.1	Precisão das determinações	91
4.3	A realização de redes de referência para monitoração	94
4.3.1	A tecnologia GPS aplicada a redes de monitoração	96
4.3.2	Confiabilidade e redundância	98
4.3.3	Rede Geodésica de pontos de controle	101
4.3.4	Rede Geodésica de pontos de referência	104
4.3.5	Rede Geodésica de pontos e alvos de monitoração	107
4.3.6	Monumentalização de pontos	108
4.3.7	Programação de observações	115
4.3.8	Coleta de dados	119
4.3.8.1	Rede de referência	119
4.3.8.2	Carregamento da Estrutura	120
4.3.8.3	Pontos a serem monitorados	120
4.3.9	Processamento e tratamento de dados	121
5	Ensaio Realizados, Análise dos Dados e Propostas de Metodologia de Monitoração Dinâmica	125
5.1	Introdução	125
5.2	Ensaio com shaker e transdutor de deslocamentos	126
5.2.1	Análise dos resultados relativos ao experimento do shaker	130
5.3	Ensaio com carga dinâmica, Rodovia dos Imigrantes	147
5.3.1	Introdução	147
5.3.2	Estudo da região	149
5.3.3	Projeto e instalação dos mastros	152
5.3.4	Calibração da rede geodésica de referência	157
5.3.5	Ensaio no VA-19, realizados entre 08 e 11-01-2002	160
5.3.5.1	Processamento	162
5.3.6	Ensaio no VA-19 realizado em 23-09-2004	165
5.3.6.1	Análise dos resultados	166
5.4	Proposta básica de metodologia para a monitoração de estrutura com carga dinâmica pela utilização de GNSS	194
6	Conclusões e recomendações.....	196
6.1	Conclusões.....	196
6.2	Recomendações.....	197
	Anexo	199
	Lista de Referencias	208

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Sinais GPS em fase de implementação	11
Figura 2.2 Espectro de frequência do Galileo	15
Figura 2.3 Representação geométrica da propagação de uma onda senoidal.....	27
Figura 2.4 Espectro de ondas eletromagnéticas, comprimento de onda em metros	31
Figura 2.5 Refratividade (N) em função da altitude e frequência	34
Figura 2.6 Curva de ionização de Chapman	40
Figura 2.7 Periodicidade do número de manchas solares medidas a partir de 1770	42
Figura 2.8 Regiões da Terra com maior atividade ionosférica	42
Figura 2.9 Reflexão de sinais	48
Figura 2.10 Efeito de reflexão de sinais sobre a determinação de altura geométrica no método cinemático, receptor em repouso	50
Figura 2.11 Calibração de estação para modelar efeitos de multicaminhamento.....	51
Figura 2.12 Difração de sinais	52
Figura 2.13 Gráfico de disponibilidade de satélites e fator DOP para o GPS e GLONASS	59
Figura 2.14 Estratégia geral de resolução da ambigüidade no OTF	62
Figura 3.1: Sistema com um grau de liberdade.	66
Figura 3.2: Modelo com múltiplos graus de liberdade.....	68
Figura 3.3: Inter-relações dos modelos dinâmicos.....	71
Figura 3.4: Filtro Passa Alta, empregado para separar valores acima de 0,862 Hz	80
Figura 3.5 Sinal Filtrado	80
Figura 3.6 Rotação entre sistemas cartesianos	81
Figura 3.7 Sistema geodésico de coordenadas locais	83
Figura 4.1 Fluxograma geral de atividades num projeto de monitoração geodésica	87
Figura 4.2 Hierarquia de redes geodésicas na monitoração de estruturas	95
Figura 4.3 Vetores independentes e triviais	99
Figura 4.4 Conceitos de confiabilidade e redundância	100
Figura 4.5 Idealização de uma rede de referência em uma barragem	106
Figura 4.6 Elipses de erro de posições resultantes de dois vetores que se interceptam em várias situações	107
Figura 4.7 Esquema de um “bench mark”	110
Figura 4.8 Pilares para centragem forçada	111
Figura 4.9 Sistemas para centragem forçada, padrões USP e UFPR	112
Figura 4.10 Exemplos de sistemas de centragem forçada	113
Figura 4.11 Pinos para controle de recalque	114
Figura 4.12 Pinos para acoplamento de prismas e alvos com engate rápido	114
Figura 4.13 Pino para pontos de nivelamento	115
Figura 4.14 Mapa de obstruções provocada por uma árvore	116

Figura 4.15 Gráfico de GDOP considerando as obstruções acima para o mesmo conjunto de pontos	118
Figura 5.1 Antena choke ring acoplada ao shaker sobre o pilar 2 da BASE USP. No detalhe à direita observa-se o transdutor de deslocamento, acoplado	127
Figura 5.2 Gráfico de disponibilidade de satélites e GDOP durante as observações realizadas no dia 21/11/03	128
Figura 5.3 Gráfico dos dados do TD sobre o shaker, oscilando em 1 Hz, deslocamentos em m	131
Figura 5.4 Gráfico dos desvios em relação à média dos dados do TD no shaker a 1 Hz	132
Figura 5.5 Espectro dos desvios em relação à média dos dados do TD no shaker a 1 Hz	132
Figura 5.6 Sinal dos desvios em relação à média dos dados do TD no shaker a 1 Hz, após uso de filtro passa alta	133
Figura 5.7 Espectro dos desvios em relação à média dos dados do TD no shaker a 1 Hz, após uso do filtro F6	134
Figura 5.8 Desvios de altura geométrica (m) em relação à média das determinações do GPS sobre shaker a 1 Hz, sem uso de filtro	135
Figura 5.9 Espectro dos desvios de altura geométrica em relação à média, dados do GPS sobre shaker a 1 Hz, sem filtro	135
Figura 5.10 Desvios de altura geométrica em relação à média, após uso de filtro passa banda LSFIR	136
Figura 5.11 Gráfico dos dados do TD sobre o shaker, oscilando em 2 Hz, deslocamentos em m	137
Figura 5.12 Gráfico dos dados do TD sobre o shaker, oscilando em 2 hz, deslocamentos em m, após filtragem	138
Figura 5.13 Gráfico dos desvios em relação à média dos dados do TD sobre o shaker, oscilando em 2 Hz, deslocamentos em m	139
Figura 5.14 Espectro dos desvios em relação à média dos dados do TD sobre o shaker, oscilando em 2 Hz. A) 2048 épocas com filtro, B) 1024 épocas sem filtro	139
Figura 5.15 Desvios de altura geométrica em relação à média, dados do GPS sobre shaker a 2 Hz, sem uso de filtro	140
Figura 5.16 Espectro dos desvios de altura geométrica em relação à média, dados do GPS sobre shaker a 2 Hz, com filtro	140
Figura 5.17 Gráfico dos desvios em relação a média das alturas geométricas para as 2048 épocas	141
Figura 5.18 Dados do TD com o shaker oscilando a 4 Hz	142
Figura 5.19 Dados do TD com o shaker oscilando a 4 Hz, detalhe dos desvios da série. À direita o espaçamento do eixo X se dá a cada segundo. À esquerda, a cada 0,1 segundo	142
Figura 5.20 Espectro do sinal do TD com o shaker oscilando a 4 Hz (Filtro Passa Alta)	143
Figura 5.21 Espectro do sinal do TD com o shaker oscilando a 4 Hz (Filtro Passa Banda)	143

Figura 5.22 Desvios do TD sobre shaker a 4 Hz (Filtro Passa Alta)	144
Figura 5.23 Desvios do TD sobre shaker oscilando a 4 Hz (Filtro Passa Banda)	144
Figura 5.24 Desvios em relação à média de altura geométrica com o shaker a 4 Hz	145
Figura 5.25 GPS 4 Hz filtro passa alta sobre os desvios em altura geométrica a 4 Hz	146
Figura 5.26 Sinal gerado pelo filtro sobre os desvios em altura geométrica a 4 Hz	146
Figura 5.27 Vista geral do viaduto VA-19	148
Figura 5.28 Croqui com a disposição dos possíveis locais para instalação das referências e o local do experimento na SP 160	150
Figura 5.29 Construção do pilar ECO4 e instalação do dispositivo de centragem forçada no pilar ECO2	151
Figura 5.30 Modelo do tabuleiro com os mastros	153
Figura 5.31 Mastro construído, detalhe do acoplamento	153
Figura 5.32 Furação da estrutura para acoplamento	154
Figura 5.33 Momento do acoplamento e mastro acoplado	155
Figura 5.34 Vista de 2 mastros instalados no VA-19, com antenas posicionadas	155
Figura 5.35 Deslocamentos do centro de fase e do ponto na estrutura do VA-19	157
Figura 5.36 Croqui da rede de representação das elipses de erro, $\alpha = 95\%$	158
Figura 5.37 Distribuição dos resíduos normalizados	159
Figura 5.38 Detalhes das elipses de erro, $\alpha = 95\%$	159
Figura 5.39 Instalação da antena no mastro	161
Figura 5.40 Diferenças de coordenadas cartesianas geocêntricas relativas a M2RF considerando-se uma sessão entre as 21:08 as 21:23 em tempo GPS	164
Figura 5.41 Quantidade de satélites durante a sessão de rastreamento	164
Figura 5.42 Atividade ionosférica a partir de 1995	165
Figura 5.43 Posicionamento dos acelerômetros e extensômetros	167
Figura 5.44 Espectros de frequências determinados pelos dados dos acelerômetros no topo do mastro e no pavimento	167
Figura 5.45 Gráfico de ocupação e receptores no dia 23/09/2004	168
Figura 5.46 Gráfico de DOP para MST1 na 1ª sessão	169
Figura 5.47 Gráfico de DOP para MST1 na 2ª sessão	169
Figura 5.48 Mastro 1, dados L2, sinal dos desvios em Este, após uso de Filtro Passa Alta	171
Figura 5.49 Mastro 1, dados L2, espectro do sinal dos desvios em Este, após uso de Filtro Passa Alta	171
Figura 5.50 Mastro 1, dados L2, sinal dos desvios em Norte relativos a uma época inicial, após filtragem	172
Figura 5.51 Mastro 1, dados L2, espectro do sinal dos desvios em Norte após filtragem	172
Figura 5.52 Mastro 1, dados L2, sinal dos desvios em altura geométrica relativa a uma época inicial, após filtragem	173
Figura 5.53 Mastro 1, dados L2, espectro do sinal dos desvios em altura geométrica, após filtragem	173

Figura 5.54 Espectro do sinal dos desvios em h para o mastro 1, dados L1, Filtro Passa Alta	175
Fig. 5.55: Sinal e espectro de potência de ondaleta dos desvios do TD sob o shaker operando em 4 Hz, sem uso de filtro	178
Fig. 5.56: Sinal e espectro de potência de ondaleta dos desvios do GPS sobre o shaker operando em 4 Hz, sem uso de filtro	179
Fig. 5.57: Sinal e espectro de potência de ondaleta dos desvios do GPS sobre o shaker operando em 4 Hz, com uso de filtro	180
Fig. 5.58: Sinal de D_h e espectro de potência de ondaleta, no mastro 1, resultante de L1, sem filtragem	183
Fig. 5.59: ampliação do gráfico da figura 5.58.....	184
Fig. 5.60: Sinal de D_h e espectro de potência de ondaleta, no mastro 1, resultante de L1, com filtragem	185
Fig. 5.61: Sinal de D_e e espectro de potência de ondaleta, no mastro 1, resultante de L2, com filtragem	186
Fig. 5.62: Sinal de D_n e espectro de potência de ondaleta, no mastro 1, resultante de L2, com filtragem	187
Fig. 5.63: Sinal de D_h e espectro de potência de ondaleta, no mastro 1, resultante de L2, com filtragem	188
Fig. 5.64: espectro de potência com janelamento de Hanning, para o sinal de, resultante de L2, no mastro 1, com uso de filtro passa alta	189
Fig. 5.65: espectro de potência com janelamento de Hanning, para o sinal dn , resultante de L2, no mastro 1, com uso de filtro passa alta	190
Fig. 5.66: espectro de potência com janelamento de Hanning, para o sinal dh , resultante de L2, no mastro 1, com uso de filtro passa alta	190
Figura 5.67: Frequência natural determinada no VA 19 e de pontes ensaiadas por Penner 2001	191
Figura 5.68: deformada modal do Primeiro modo de vibração do modelo do tabuleiro VA-19	193
Figura 5.69: deformada modal do segundo modo de vibração do modelo do tabuleiro do VA-19	193

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Melhoramentos no posicionamento e fontes de erros limitantes	10
Tabela 2.2 Parâmetros de transformação PZ-90 para WGS-84	13
Tabela 2.3 Erros (95%) previstos exclusivamente para o SIS-URE no posicionamento	17
Tabela 2.4 Fontes de erros e seus efeitos associados às observações GPS	19
Tabela 2.5 Camadas da atmosfera	24
Tabela 2.6 Prefixos, símbolos e ordens de magnitude	32
Tabela 2.7 Faixas de frequências eletromagnéticas	33
Tabela 2.8 Faixas de frequências eletromagnéticas, bandas radar	33
Tabela 2.9 Influência da refração troposférica sobre distâncias medidas (m)	38
Tabela 2.10 Camadas da ionosfera	40
Tabela 2.11 Efeitos ionosféricos sobre as distâncias satélite receptor	46
Tabela 2.12 Exemplos de Precisões necessárias em posicionamento de trajetórias	57
Tabela 3.1 Exemplo de coordenadas de dois pontos transformadas para vários sistemas de coordenadas (datum WGS-84)	85
Tabela 4.1 Padrões geométricos de posicionamento relativo	102
Tabela 4.2 Precisões absolutas para o ponto fixo	103
Tabela 4.3 Tabela de programação de sessões de rastreamento GPS	119
Tabela 5.1 Observações do 3º experimento, dia 21/11/03, analisadas	129
Tabela 5.2 Estatística Global	158
Tabela 5.3 Estatística das observações	158
Tabela 5.4 Coordenadas geodésicas ajustadas	158
Tabela 5.5 Covariâncias	160
Tabela 5.6 Estatística da solução OKIN L2, para ECO4-MST1	170
Tabela 5.7 Resultados obtidos com processamento L2 no viaduto VA-19	174
Tabela 5.8: Modos de vibração do VA-19	192

LISTA DE ABREVIATURAS

AII	Accuracy Improvement Initiative
CCD	Charge-Coupled Devide
COSPAS	COsmicheskaya Sistyema Poiska Avariynich Sudov Space System for the Search of Vessels in Distress
CS	Commercial Service
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DGPS	Differential Global Position System
DOP	Dilution Of Precision
EGNOS	European Geoestationary Navigation Overlay Service
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EQFIR	Equiripple Frequence Impulse response
EPO	Espectro de Potência de Ondaleta
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FDMA	Frequency Code Division Multiple Access
FFT	Transformada Rápida de Fourier
FRF	Função de Resposta em Frequência
GAGAN	Aided Geo-Stationary Satellite Augment Navigation
Galileo	Sistema europeu de navegação global por satélite
GAS	GPS Adjustment Software
GDOP	Geometric Dilution Of Precision
GLONASS	GLOBAL Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HDOP	Relativo à posição horizontal
HI	Altura instrumental
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ITRF	International Terrestrial Reference System
LEM	Laboratório de Estruturas e Materiais da EPUSP
LSETECH	Laboratório de Sistemas Estruturais
LSFIR	Least Square Frequency Impulse response
LTG	Laboratório de Topografia e Geodésia da EPUSP
MEF	Modelo de elementos Finitos

OS	Open Service
OTF	On The Fly
PDOP	Relativo à posição tridimensional
PPS	Precise Point Positioning
PRS	Public Regulated Service
QZSS	Quasi Zenith Satellite System
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RHCP	Polarização circular à direita
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMS	Desvio Médio Quadrático
RTCM SC-104	Comite Especial 104 do Radio Technical Commission for Marine Services
RTK	Real Time Kinematic
SA	Selective Availability
SAR	Search and Rescue Support Service
SARSAT	Search And Rescue Satellite-Aided Tracking
SBAS	Satellite Based Augmented System
SCO	Segmento de Controle Operacional
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGCL	Sistema Geodésico de Coordenadas Locais
SISURE	Signal-in-Space URE
SOL	Safety-Of-Life Service
SPS	Serviço de Posicionamento Padrão
TD	Transdutor de deslocamentos
TDOP	Relativo à coordenada do tempo
TEC	Total Electron Content
UEE	User Equipment Error
UERE	User Equivalent Range Error
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UHF	Ultra High Frequency
UNESP	Universidade Estadual Paulista
URE	User Range Error
USACE	United State Army Corps of Engineers
VDOP	Relativo à posição vertical
VHF	Very High Frequency
WPS	Wavelet Power Spectrum

1 INTRODUÇÃO

Pontes, barragens, edifícios e outras obras civis representam uma das maiores parcelas de investimento de recursos nacionais. A boa condução da economia é altamente dependente da disposição racional e operação eficiente destas obras; haja vista que, elas, não somente fornecem abrigo para diversas atividades humanas, mas também são fatores críticos na infra-estrutura, pois, vencem acidentes geográficos, estabelecem a comunicação, viabilizam o transporte dos insumos e da produção, proporcionam a geração de energia, a manufatura de bens, bem como possuem alta relevância na defesa do território, entre outras atividades vitais para uma nação.

A ocorrência de falhas num ambiente estrutural, além de fator de prejuízo econômico, representa risco à vida humana e risco ambiental. Em sistemas estruturais, as falhas podem dar-se por diferentes razões e graus de intensidade. Como exemplos extremos de causas, podem ser citados: o recalque do alicerce de uma parede que provocou uma fissura e até os efeitos tais como, um terremoto que faz vibrar toda uma região, provocando danos que podem destruir de forma ampla a infra-estrutura de um país e ceifar milhares de vidas.

Com maior frequência do que os exemplos anteriores podem ocorrer comprometimentos parciais ou totais de estruturas devido a escorregamentos de taludes, inundações, fadiga por excessivo tempo de uso ou mesmo acidentes com veículos. Merece ser citada, ainda, outra causa não tão dramática, mas também potencialmente nociva, por atuar há longo prazo e de forma a acelerar o processo de fadiga, passando por imperceptível para a maioria. Trata-se, fruto do descaso, da lentidão nas ações e da ineficiência na manutenção de uma estrutura, que em decorrência deste comportamento acaba por atingir estados limites de segurança antes mesmo antes do fim de sua vida útil. Decorrem das razões exemplificadas esforços superiores à resistência suportada por um ou mais elementos estruturais.

Nas últimas décadas verifica-se a intensificação de investigações com objetivo de desenvolver técnicas confiáveis de identificação de propriedades dinâmicas de estruturas. Neste contexto estão as pontes de concreto, uma importante parcela da infra-estrutura de um país e que, por sua natureza, estão sujeitas a ações dinâmicas com mais frequência. A avaliação do comportamento estrutural de pontes

requer que sejam consideradas variáveis geométricas (deslocamentos e deformações) e mecânicas (esforços).

Por outro lado os últimos cinquenta anos representaram um grande desenvolvimento para a Geodésia e tecnologias associadas, ampliando os campos de atuação desta ciência. Um deles relaciona-se às obras de engenharia, agregando novos métodos geodésicos de monitoração de estruturas.

O desenvolvimento e os interesses comuns verificados em ambas as áreas acima citadas motivam o objetivo da presente pesquisa. Esta visa avaliar o emprego da tecnologia de posicionamento geodésico por satélite, mais especificamente o Sistema de Posicionamento Global, através de uma metodologia desenvolvida para se determinar os deslocamentos espaciais de pontos na estrutura de um viaduto construído em viga Gerber, sob a ação dinâmica do tráfego da rodovia. A partir das séries temporais derivadas das posições determinadas pelo método de posicionamento relativo cinemático ou semi-cinemático e aplicação de filtros digitais, obteve-se a identificação de frequências naturais de vibração na estrutura comparando-as com aquelas também obtidas por acelerômetros. Identificadas as frequências foram determinados os deslocamentos dos elementos experimentados.

1.1 Justificativa

De forma sintética Armer (2001) aponta as opções de projeto disponíveis para que o engenheiro atinja os requisitos solicitados para que um sistema estrutural possa se comportar de modo satisfatório. São elas:

1. proporcionar uma estrutura básica forte;
2. proporcionar redundância dentro da estrutura básica;
3. proporcionar defesa sacrificial para a estrutura;
4. proporcionar sistemas de monitoração que darão o alarme em caso de condições inadequadas da estrutura.

Em que pesem todos os cuidados necessários nas fases de projeto e construção, a complexidade de uma estrutura e as ações que esta sofrerá em sua existência, sempre acarretam em um grau de “desconfiança de uma possível

insegurança quanto ao seu comportamento, seja em relação aos possíveis estados limites últimos, seja em relação a possíveis estados limites de utilização” FUSCO (1996).

Nas últimas décadas foram introduzidos significativos melhoramentos nos conceitos de projetos estruturais, mas o aperfeiçoamento de modelos de cálculo não pode prescindir de informações mais realistas. Esta necessidade se verifica tanto para as novas estruturas quanto para aquelas já construídas, pois também, requerem avaliações sistemáticas do seu desempenho. Ambos os casos contribuem tanto para verificar o cumprimento e manutenção das características de projeto, quanto para colher subsídios em benefício de melhoramentos em futuros modelos, bem como avaliar o desempenho de novos materiais.

Mais do que fazer parte da manutenção de uma estrutura, o adequado monitoração desta deve ser condição integrante desde o planejamento, para que possa repercutir de forma positiva nas fases subseqüentes de projeto, construção e operação. Portanto, a monitoração estrutural deve estar previsto como uma das premissas, implantando-o desde o princípio da obra.

A monitoração de estruturas tem também na Geodésia e na Topografia, com suas tecnologias afins e metodologias, aliados que contribuem para proporcionar a posição espacial de pontos em elementos estruturais, fazendo-o a partir de pontos de referência externos e independentes das estruturas, contribuindo com informações para o modelo de resposta das mesmas.

1.2 A tecnologia de posicionamento por satélite na monitoração de obras de engenharia – estado da arte

A monitoração de estruturas por métodos geodésicos ou topográficos ocorre desde há muitas décadas, quando então se baseava principalmente na observação de ângulos, distâncias e desníveis. Para tanto, se usavam procedimentos tais como: a triangulação, a trilateração e o nivelamento. Caracterizavam-se por uma maior morosidade na fase de aquisição de dados, sendo estes registrados manualmente e

processados dentro de limites computacionais mais estreitos que aqueles de que se dispõe atualmente.

HENNEBERG (1972) cita como recordação histórica os trabalhos desenvolvidos na Suíça no ano de 1919 para investigação das deformações de muros de contenção através das clássicas redes trigonométricas. Nas oito décadas seguintes as pesquisas e o desenvolvimento tecnológico permitiram ultrapassar fronteiras. Surgiram tecnologias tais como os distanciômetros eletrônicos, aperfeiçoou-se a fotogrametria, desenvolveram-se sistemas de satélites de posicionamento e imageamento, evoluíram os sistemas inerciais, incorporou-se a informática, as leituras por código de barras, o reconhecimento automático de alvos e mais recentemente surgiram os sistemas de varredura a laser. Ainda hoje, em certos casos, os métodos clássicos são eficientes, porém evoluídos em relação àqueles do princípio, diferindo pela precisão instrumental, registro eletrônico, tomada de imagens, uso de equipamentos robóticos e programas computacionais que ampliaram sobremaneira a capacidade de aquisição, processamento e tratamento dos dados. Além das tecnologias, novas teorias e metodologias, proporcionam maior eficiência e ampliam os horizontes geodésicos.

Na década de 1980, o desenvolvimento da tecnologia de posicionamento geodésico por métodos espaciais, através do estabelecimento do sistema de satélites GPS, bem como a revolução proporcionada pela informática, viabilizaram o desenvolvimento de novas aplicações da geodésia, voltadas à construção e monitoração de grandes obras de engenharia. Entre outras aplicações, destacam-se os trabalhos desenvolvidos para a construção de aceleradores de partículas, LEICK (1995), a monitoração de barragens e de subsidência de plataformas de exploração de petróleo COLLINS (1986) apud WELLS (1987) e a monitoração de escorregamento de encostas STEWART 2001(informação pessoal).

Contudo até pouco mais de uma década o instrumental geodésico em geral era fortemente limitado pela frequência de aquisição dos dados, o que resultava em métodos que se adequavam melhor ao monitoração com carga estática ou com dinâmica bastante lenta. Uma vez mais a tecnologia de posicionamento geodésico por satélite permitiu romper com este limite em meados da década de 1990, quando

foram lançados os receptores capazes de realizar observações com frequências de 10 Hz. Desde então surgiram linhas de pesquisa associadas a comportamentos dinâmicos.

ÇELEBI et al. (1998) propõe um método para monitoração de altos edifícios com estrutura de aço, baseado na tendência de oscilação destas estruturas dentro de períodos medido em segundos e variando entre os extremos de $(0,05 - 0,015) \times N$, sendo N o número de andares. Em seus experimentos, empregou o GPS acoplado a barras de aço, simulando edifícios. Obteve a determinação de frequências de 0,0245 Hz e 0,296 Hz e uma taxa de amortecimento de 2% fazendo a barra oscilar entre até 0,4 m. Em 1999 apresentou resultados para um edifício de 44 andares, com deslocamentos de até 1 cm e frequência se 0,23 Hz apesar dos ruídos das observações GPS, comparando-os com os acelerômetros.

Na área de sísmica, GE (1999) descreve os experimentos realizados em 1998, com uso de um shaker mecânico, acelerômetros e 2 receptores GPS Leica CRS 1000, simulando um sismômetro, no topo do edificio dos cursos de Geografia e Agrimensura de New South Wales. Operando no método cinemático em tempo real (RTK) com taxa de aquisição de 10 Hz, obteve resultados imediatos, interpretando-os com uso de filtros de resposta de impulso com duração finita por mínimos quadrados. Foram detectadas as frequências de oscilação do shaker (2,3 e 4,3 HZ) e a amplitude dos seus movimentos de até 12,7 mm em altimetria e planimetria, destacando que o principal problema encontrado foram os ruídos em baixa frequência devidos a multicaminhamento, efeitos atmosféricos e ruído dos receptores.

No Brasil, Larocca (2003) aplica método apresentado por Schaal (2002) para avaliar a utilização do GPS como ferramenta de pesquisa no estudo do comportamento dinâmico de obras viárias. Baseando-se na análise dos resíduos resultantes do processamento da dupla diferença de fase de satélites em direções quase ortogonais entre si e “análise espectral para filtragem de informações indesejáveis” aplicou esta metodologia a ensaios realizados com trens tipo com cargas de 20 e 40 t na ponte estaiada Hawkshaw e também na ponte estaiada Pierre Laporte no Canadá, cujos vãos são da ordem de 217m e 670 m, respectivamente. Os

ensaios analisados por Fourier demonstraram as frequências de 0,57 Hz e 0,6 Hz para os movimentos verticais e transversais da primeira e com deslocamentos de até 8 cm, estando os receptores base instalados nas proximidades dos encontros (~ 0,4 km). Na segunda foram utilizados os dados dos ensaios de SANTERRE et al. (1977) apud LAROCCA (2003), confirmando-se os resultados dos ensaios anteriores com frequência vertical de 0,21 Hz e deslocamentos de 5 a 10 cm, sob situação de tráfego normal, estando os receptores base localizados entre 0,3 a 1 km dos pontos monitorados.

ROBERTS (2006) realizou ensaios na ponte suspensa de Fourth Road Bridge na Escócia, no ano de 2005, fazendo transitar, pelos 1005 m do vão central da ponte, veículos com cargas de até 100 t, enquanto 7 receptores Leica 530, 510 e 1200 com antenas 'choke ring' adquiriam dados a uma taxa de 10 Hz e 20 Hz. Cinco receptores foram estacionados no tabuleiro, acoplados ao guarda corpo de estrutura metálica e dois nas torres do lado sul. Dois outros receptores permaneceram como base fora da ponte, em tripés, vinculando-se também uma estação de operação contínua do Ordnance Survey. Os receptores operaram por 46 horas, inclusive com o tráfego normal. Foram usados sistemas inerciais INS Aplanixx para uma investigação em paralelo, mas não relatada, descartando-se acelerômetros com a justificativa de que movimentos com alta velocidade não eram esperados devido a características da estrutura. Foram realizadas análises sobre o rebaixamento do tabuleiro e sua correlação com o aumento de temperatura, demonstrando como aquele movimentava cerca de 0,2 m em altura enquanto esta varia 5,5° C no decorrer do dia. Empregaram-se também comparações com o modelo gerado por elementos finitos, verificando-se através de análise de Fourier, torções com frequência de 0,27 Hz no centro do vão. As cargas demonstraram deslocamentos verticais de cerca de 0,4 m.

1.3 Objetivos desta pesquisa

Esta pesquisa foi desenvolvida com os objetivos básicos seguintes:

- desenvolver estudos e ensaios voltados à monitoração de estruturas por metodologias geodésicas nas condições brasileiras;

- contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia específica para realizar redes geodésicas de referência com aplicação voltada à monitoração de estruturas;
- avaliar o uso dos sistemas de posicionamento geodésico por satélite, em especial o GPS, como ferramenta para a monitoração de estruturas com carga dinâmica;
- contribuir para a difusão dos conceitos de manutenção de sistemas estruturais, pelo acompanhamento contínuo do seu desempenho em condições reais de utilização, bem como a aplicação dos resultados decorrentes no desenvolvimento de novos modelos.

No capítulo 2 se discorre brevemente sobre as principais tecnologias de posicionamento por satélites, com foco maior sobre o GPS, destacando-se as principais fontes de erro que afetam o posicionamento com alta precisão, bem como a descrição geral de métodos cinemáticos e semi-cinemáticos.

No capítulo 3 se discorre sobre conceitos a respeito de deslocamentos, sistemas dinâmicos, análise modal e transformação de coordenadas, considerados necessários ao trabalho realizado.

No capítulo 4 são apresentados os conceitos sobre a monitoração geodésica abordando-se os conceitos de precisão das determinações, de redes geodésicas de referência e de procedimentos para realização de observações e tratamento de dados.

No capítulo 5 apresenta-se a descrição de dois dos ensaios realizados com objetivo de se avaliar uma metodologia da aplicação da tecnologia de posicionamento por satélite na monitoração de estruturas. O primeiro caso descreve um experimento realizado na base de calibração de distanciômetros eletrônicos da EPUSP empregando-se um shaker e um transdutor de deslocamento (TD), com objetivo de se investigar a capacidade do GPS detectar os deslocamentos produzidos pelo shaker e medidos também pelo transdutor. O segundo relata um ensaio realizado no viaduto ascendente 19 (VA-19) da rodovia dos Imigrantes, com objetivo de detectar os deslocamentos e frequências de vibração naquele viaduto. Ao final

apresenta-se uma proposta básica de metodologia para a monitoração de estrutura com carga dinâmica pela utilização de GNSS.

No capítulo 6 estão dispostas as conclusões e recomendações da presente pesquisa.

2 MÉTODO DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE

2.1 Introdução

A tecnologia de posicionamento por satélite é empregada em Geodésia desde a década de 60. As aplicações geodésicas no campo da engenharia utilizam esta tecnologia através dos sistemas GPS (Global Positioning System) há aproximadamente 20 anos. O GPS se mostrou revolucionário, proporcionando alta precisão nas determinações, apresentando maior praticidade na operação dos instrumentos, os quais, sob vários aspectos, são automatizados, bem como permitem a integração com equipamentos de outras tecnologias. Neste particular pode-se citar os sistemas inerciais, acelerômetros, câmaras aerofotogramétricas, sondas hidroacústicas, sistema laser e computadores de bordo com sistemas de informação espacial para várias finalidades, dentre elas a navegação.

O sucesso desta revolução tecnológica se comprova hoje pelas mais diversas aplicações e pelo volume de negócios que, seguramente, ultrapassa a casa de uma dezena de bilhões de dólares anuais. A modernização do GPS, o projeto deflagrado pela União Européia, com seus dois sistemas: o Galileo e o European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) (geo-estacionário), e a retomada dos investimentos do GLONASS, são demonstrativos patentes da utilidade que tais tecnologias proporcionam à humanidade, agregando a eles outros sistemas menores e de âmbito regional, no Japão (Quasi Zenith Satellite System - QZSS), na China (Compass) e na Índia (GAGAN), bem como redes geodésicas ativas ao redor do globo. Todos estes sistemas integrados compõem o Global Navigation Satellite System (GNSS).

Este capítulo discorre brevemente sobre as principais destas tecnologias, com foco maior sobre o GPS, ferramenta empregada na pesquisa.

2.2 Sistemas de posicionamento por satélite

2.2.1 GPS

O sistema de posicionamento por satélite GPS está adentrando por uma fase de melhoramentos. A primeira fase, chamada de *Accuracy Improvement Initiative* (AII), compreende o uso de coordenadas do *IERS Terrestrial Reference Frame* (ITRF) em suas estações de monitoramento, bem como a melhoria na precisão das efemérides transmitidas, adicionando-se mais seis estações à rede de monitoramento.

A tabela 2.1 apresenta um sumário das melhorias resultantes na precisão do posicionamento e fontes limitantes de erro desde o início da década de 80, conforme TEUNISSEN e KLEUSBERG (1998).

TABELA. 2.1: MELHORAMENTOS NO POSICIONAMENTO E FONTES DE ERROS LIMITANTES.

Fonte: Teunissen e Kleusberg (1998).

Ano	B (ppm)	Fonte de melhoramentos.	Fonte primária de erro.
~1983	1	Receptores geodésicos (mensuração da fase da portadora)	Refração atmosférica, acurácia orbital.
~1986	0,1	Mensuração da fase da portadora nas duas frequências	Refração troposférica, acurácia orbital.
~1989	0,001	Estações de monitoramento global (CIGNET)	Refração troposférica, acurácia orbital.
~1992	0,005	Desenvolvimento do monitoramento global (IGS)	Troposfera, órbitas, erro de centro de fase da antena.
~1997	0,001	Órbita, troposfera, modelagem de antena.	Estrutura de referência global, erros específicos da estação, gradientes atmosféricos.

A segunda fase é chamada de modernização do GPS e inclui a adição de novos sinais para uso civil, denominados de L2C na frequência L2 e o sinal L5, com frequência de 1.176,45 MHz. O primeiro está em implantação desde dezembro de 2005 com o lançamento de um satélite IIR-M; o segundo sinal tem disponibilidade com a operação dos satélites do bloco IIR-M e IIF. A figura 2.1 apresenta o espectro de frequência dos sinais em fase de implantação.

A partir de 2004 tiveram início os estudos para a introdução do quarto sinal civil, o L1C, que será disponibilizado com os satélites do bloco III, IGEB (2004). Estes novos veículos espaciais proporcionarão também as seguintes vantagens: maior precisão, melhor capacidade de evitar interferência nos sinais, melhor controle de integridade (capacidade de informar rapidamente suas falhas), entre outras.

Estas alterações trarão também maior precisão no posicionamento absoluto, prevendo-se erros da ordem de 1 a 3 m ou menos quando da interoperabilidade com outros sistemas GNSS, KIM (2006).

2.2.2 GLONASS

Diferentemente do GPS e do Galileo, cada satélite russo é identificado por sua própria frequência através da técnica FDMA (*frequency division multiple access*) nas sub-bandas das frequências fundamentais de L1 e L2, que possuem 1.6 Ghz e 1.2 Ghz, respectivamente, através das seguintes relações:

$$f_{L_i} = f_0 + k \cdot \Delta f_{L_i} \quad 2.1$$

onde

$$f_0 = 1,602 MHz ;$$

$k = 0, 1, 2, \dots, 24$ é o fator que corresponde ao número de cada satélite. A resultante de $k=0$ é denominada frequência técnica;

$$\Delta f_{L_1} = 0,5625 \text{ MHz}$$

Sendo ainda a relação entre L1 e L2 condicionada por:

$$f_{L_1} / f_{L_2} = 9 / 7 \quad 2.2$$

Com esta técnica cada satélite pode ser identificado por sua frequência. Para diminuir a faixa do espectro ocupada por estes sinais o fator k foi reduzido para 12 valores, aplicando-se o mesmo número a dois satélites na mesma órbita, porém dispostos em pontos antípodas de forma que seus sinais não irradiem simultaneamente sobre a mesma região. A partir de 2005 os valores de k variam entre -7 e 4, sendo os valores 5 e 6 destinados somente a testes; as bandas de frequência passaram para 1.598,0625 – 1.604,25 MHz e 1.242,9375 – 1.247,75 MHz para L1 e L2 respectivamente.

O programa de modernização tem prioridade e previsão para conclusão em 2011. A terceira geração (K) também já se apresenta programada, com início entre 2007 e 2008 e proporcionará sinal civil também em L3 (1.381,05 MHz.). Esta geração terá veículos espaciais com vida útil de aproximadamente 10 anos. O sistema russo tem hoje uma nova política alinhando-o ao GNSS e prossegue com lançamento de novos satélites, os quais formarão uma constelação com 18 unidades operacionais.

A solução do posicionamento exclusivamente com o GLONASS é referida ao sistema PZ-90 (Parametry Zemli 1990); quando é realizado o posicionamento conjunto com GPS torna-se necessário proceder à transformação para o WGS84. Na tabela 2.2 são apresentados alguns parâmetros de transformação, determinados por vários autores, através do emprego de observações comuns em estações com coordenadas WGS84 ou ITRF conhecidas.

TABELA. 2.2: PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO PZ-90 PARA WGS-84.

Fonte: Zinoviev (2005).

ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	R_x [a. sec]	R_y [a. sec]	R_z [a. sec]	σ ($\times 10^{-6}$)
PZ-90 (KGS)						
Parameters of the Earth 1990 (1998). [Combined method (Russia)]						
0	0	1.0	0	0	-.206	0
Bazlov Y.A. et al. (1999). [Coordinate method (Russia)]						
-1.1	-0.3	-0.9	0	0	-.169	-0.12
Zubinsky V.I. (2000). [Coordinate method (Russia)]						
-1.08	-0.09	-0.41	0	0	-.154	-0.14
PZ-90 (GLONASS)						
Misra P. et al. (1996) [Ephemeris method (Global)]						
0	2.5	0	0	0	-.392	0
Roßbach U. et al. (1996) [Coordinate method (Europe)]						
0	0	0	0	0	-.330	0
Mitrikas V.V. et al. (1998) [Ephemeris method (Global)]						
-0.47	-0.51	-2.00	-.002	-.001	-.356	0.022
IGEX-98, BKG (1999) [Ephemeris method (Global)]						
0.06	0.07	-0.57	.035	-.021	-.358	-0.01
IGEX-98 BKG/ESA (2000), 1040-1058 (GPS weeks)						
Zinoviev A.E. [Ephemeris method (Global)]						
0.00	-0.18	-0.36	.010	.007	-.343	0.016
IGEX-98 (2000), Ostach O.M. [Ephemeris method (Global)]						
-0.03	-0.18	-0.49	.009	-.003	-.358	0.014
Roßbach U. (2001) [Direct estimation method (Global)]						
0.40	0.36	-0.48	.024	-.012	-.343	0
Boucher C., Z.Altanimi (2001) [Ephemeris method (Global)]						
0.07	0.00	-0.77	.019	.004	-.353	-.003

No presente, embora seja perfeitamente factível o uso da atual constelação russa somada à norte-americana, ainda predomina o emprego da tecnologia GPS no Brasil. Isto se dá, provavelmente, por questões de custo de equipamento e por desconfiança do usuário quanto à disponibilidade contínua dos satélites russos. Entretanto, aos poucos, com a retomada dessa constelação, a procura por receptores que observem sinais de ambas as constelações tem aumentado.

2.2.3 GALILEO

Com o advento do Galileo, a partir de 2010, a comunidade usuária contará com mais de 50 veículos espaciais dedicados ao posicionamento em quatro dimensões (X; Y; Z; T). A gama de serviços viabilizados será maior que a atual, agregando-se, por exemplo, a certificação de documentos e transações.

Estão previstas cinco modalidades de serviços, alguns de acesso livre e outros através de pagamento de licença de uso, quais sejam:

Open Service (OS), proporcionará serviços de posicionamento, navegação e tempo, sem custo, competindo com o Serviço de Posicionamento Padrão do GPS (SPS) e sua modernização, sendo direcionado para aplicações de mercado de massa;

Safety-Of-Life Service (SOL), a ser empregado para a maioria das aplicações em transporte onde a vida pode ser posta em perigo, estando sujeito aos padrões aeronáuticos, marítimos e ferroviários; incluirá integridade, capacidade de autenticação e também a garantia de serviço, atendendo todo o globo e proporcionando segurança em navegação mesmo nos locais sem infra-estrutura nas proximidades;

Commercial Service (CS), para uso profissional, gerará renda proporcionando valor agregado ao OS e com garantia de serviço, tais como: correções diferenciais, serviço de tempo preciso e disponibilidade de modelos de atraso ionosférico;

Public Regulated Service (PRS), para aplicações dedicadas aos setores governamentais autorizados, tais como polícia, guarda costeira e atividades de defesa; poderá ser acessado por região ou por grupos de usuários sob regras de política de segurança aplicáveis e controladas pela Europa. O PRS deverá ser operacional mesmo em períodos de crises, composto por um sinal robusto que o protege contra interferências;

Search and Rescue Support Service (SAR), proporcionará auxílio ao sistema COSPAS-SARSAT, aumentando a precisão na localização da origem dos sinais de socorro e divulgação de avisos de desastres, quase em tempo real, em qualquer parte da Terra. O Galileo introduzirá novas funções no sistema retornando mensagens aos operadores dos procedimentos de alarme de emergências.

A figura 2.2 mostra o espectro de sinais disponibilizados pelo sistema com identificação daqueles que são compatíveis com o GPS e com o GLONASS.

FIGURA 2.2: ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DO GALILEO.

Fonte: Hein et al. (2002).

Com a diversificação dos sistemas de posicionamento e a evolução do conceito GNSS verifica-se uma corrida da indústria de equipamentos através de oferta ao mercado de receptores com características variadas. Alguns podem receber sinais GPS e GLONASS, outros também do GALILEO, ao menos em fase experimental. Há também aqueles que se beneficiam do EGNOS, um sistema de aumento de serviços baseado em satélites (Satellite Based Augmented System - SBAS) geo-estacionários que emitem sinais na frequência L1 proporcionando capacidade adicional de mensuração de distância, correções diferenciais, bem como maior integridade.

Sem dúvida a aplicabilidade do posicionamento ao tema desta pesquisa sofrerá impactos positivos em decorrência do aumento da constelação de satélites. Porém, a maior diferença virá com os novos sinais disponíveis e em função dos resultados das pesquisas decorrentes, as quais, tal como ocorreu num passado recente, abrirão novas perspectivas na solução de problemas associados ao posicionamento geodésico preciso.

Os seguintes sítios podem ser consultados para maiores informações sobre estes sistemas:

GPS

<http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/default.htm>

<http://pnt.gov/>

GLONASS

<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>

<http://www.mcc.rsa.ru/IACKVO/ENG/Main.htm>

GALILEO

http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/Galileo/documents/brochure_en.htm

<http://www.Galileoic.org/la/?q=tr/node/28>

A aplicação exclusiva do GPS nesta pesquisa deveu-se a questões orçamentárias na aquisição dos receptores. No ano de 1997, quando do princípio destes estudos, já havia disponibilidade de receptores GNSS e a constelação russa contava até com um número um pouco maior de veículos espaciais. Alguns testes bem simples, com a antena oscilando, foram conduzidos na base de calibração da EPUSP com um receptor disponibilizado naquele momento. Constataram-se resultados mais promissores do que o uso exclusivo do GPS, destacando-se a rapidez na solução de ambigüidades.

2.3 Fontes de erros nas observações

A análise dos efeitos de fontes de erros no posicionamento é, usualmente, feita a partir da resultante das fontes na determinação da distância satélite-receptor. O efeito combinado destas fontes projetado sobre a distância é denominado na literatura

inglesa por *User Equivalent Range Error* (UERE) ou *User Range Error* (URE). O URE é separado, por vezes, em *Signal-in-Space URE* (SIS-URE) e *User Equipment Error* (UEE), em razão do Segmento de Controle Operacional (SCO) ser responsável somente pelo primeiro, abrangendo, conforme SEEGER (2003), os erros do relógio dos satélites e das efemérides preditas, o ruído residual do processo de estimativa do estado do SCO, bem como outros erros residuais. Dentro desta abrangência estão excluídos os seguintes efeitos: erros instantâneos no modelo da ionosfera para receptores de frequência simples, erros do modelo da troposfera, ruídos do receptor, variações do centro de fase da antena e efeitos de multi-reflexão dos sinais. Tais aspectos são pertinentes ao UEE.

Considerando-se que a disponibilidade seletiva (Selective Availability - SA) esteja inativa, como vem ocorrendo desde 2001, o padrão de acurácia do SIS-URE na medida de distância é de 6 m (95% de nível de confiança), para o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS). Relacionando-o ao posicionamento, ter-se-ão as estimativas de erro conforme mostrado tabela 2.3. Entenda-se como locais adequados e desfavoráveis aqueles que proporcionam horizonte desobstruído e parcialmente obstruído com efeitos de multicaminhamento, por exemplo.

TABELA. 2.3: ERROS (95%) PREVISTOS EXCLUSIVAMENTE PARA O SIS-URE NO POSICIONAMENTO.

Fonte: Seeber (2003).

FONTES		ERROS
Posicionamento	em	≤ 13 m horizontal (ϕ, λ)
locais adequados		≤ 22 m vertical (h)
Posicionamento	em	≤ 36 m horizontal (ϕ, λ)
locais desfavoráveis		≤ 77 m vertical (h)

Este padrão é pertinente ao posicionamento absoluto, sendo aqui exposto para uma primeira abordagem, bem como, exemplificar os efeitos das fontes de erro sobre as observações. Verifica-se, entretanto, que este posicionamento tem apresentado resultados tipicamente mais satisfatórios, conforme exemplo demonstrado em Bueno (2001). Em situações que requerem maior precisão é necessário lançar mão dos métodos diferenciais e relativos de forma a cancelar ou reduzir a níveis adequados os

efeitos dos erros sobre as determinações. Hoje, também existe o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) que vem atingindo níveis equivalentes de precisão, porém com tempo de observação mais prolongado.

Do acima exposto, pode-se deduzir que as grandezas obtidas com o posicionamento por satélite são resultantes da operação de um sistema de mensuração complexo. Este é condicionado por modelos matemáticos através dos quais se pretende depreender a realidade física. Tal como ocorre noutras tecnologias de mensuração, na determinação dos parâmetros destes modelos funcionais e estocásticos estão presentes os inevitáveis erros de observação decorrentes da impossibilidade de se conseguir modelar completamente aquela realidade. Estes erros, numa abordagem clássica, podem ser agrupados em: grosseiros, sistemáticos e aleatórios.

Requerem maior atenção os dois últimos e dentre eles os sistemáticos, pois os erros grosseiros podem ser atribuídos predominantemente às falhas do sistema ou falhas de operação. Embora nem sempre se apresentem de fácil identificação, estas falhas podem ser evitadas ou descobertas pela adoção de procedimentos adequados e uma suficiente redundância no projeto e na realização das observações. As variáveis aleatórias, por sua vez, não apresentam relação funcional com as observações, devem ser de pequena magnitude e permanecem após a remoção dos dois outros erros, exigindo estimativa através de funções de distribuição de probabilidade.

Os efeitos sistemáticos sobre as observações dos satélites de posicionamento podem ser agrupados em conformidade com suas possíveis fontes, nominalmente:

- os satélites;
- o meio de propagação dos sinais;
- o receptor;
- o ambiente no entorno da estação.

Os efeitos originados por estas fontes estão dispostos na tabela 2.4. Note que o multicaminhamento foi associado a mais de uma fonte. Os efeitos de maré e carga dos oceanos e da atmosfera não devem ser considerados como erros especificamente, mas sim como deslocamentos do corpo terrestre. Devem ser corrigidos em determinados casos, função da adoção de convenções ou em razão do interesse em estudos específicos.

TABELA. 2.4: FONTES DE ERROS E SEUS E EFEITOS ASSOCIADOS ÀS OBSERVAÇÕES GPS.

FONTES	ERROS
Satélites	Erro de órbita Erro de relógio Efeitos de relatividade Atraso entre as portadoras no hardware do satélite
Meio de propagação dos sinais	Refração ionosférica Refração troposférica Perda de ciclo Multicaminhamento ou reflexão do sinal
Receptor	Erro do relógio Atraso de propagação dos sinais entre canais Variação do centro de fase da antena Ruído do receptor
Estação	Erro das coordenadas Multicaminhamento, imagem e difração Estabilidade do monumento Ruído de processamento

Verifica-se que o posicionamento relativo através do sistema GPS é influenciado por uma série de fatores função dos erros acima referidos ou de fenômenos associados à Terra, tais como:

- uso de uma ou duas frequências;
- nível de ruído na aquisição de sinal no receptor;
- método de posicionamento;
- distância entre estações;
- período de observação;
- geometria entre a constelação de satélites e os receptores em operação;
- modelagem dos dados;
- precisão das órbitas;
- ionosfera;
- troposfera;
- estabilidade do relógio do receptor;
- precisão das coordenadas da estação de referência (ponto fixo);
- multi reflexão, imagem, difração e interferência dos sinais;
- efeitos relativísticos;
- forças de maré: carga oceânica sobre a crosta terrestre; maré terrestre e carga atmosférica.

Várias destas influências podem ser canceladas ou reduzidas com técnicas de posicionamento relativo. Discorrer em profundidade sobre todos estes fatores seria

demasiadamente extenso e ultrapassaria o escopo deste capítulo que é fornecer informações que possam auxiliar na execução de trabalhos geodésicos aplicados à monitoração. Estudos mais amplos podem ser realizados a partir de Monico (2005), Seeber (2003), Fonseca Jr (2002) e Parkinson (1996) entre outros, já citados ao longo do texto.

Apesar do posicionamento relativo e demais estratégias implementadas, ainda persistem efeitos de fontes de erros que podem prejudicar as determinações de coordenadas. Estas fontes abrangem um número maior do que aquelas que serão descritas a seguir e podem ser estudadas, em maior profundidade, na literatura acima citada. Com relação ao posicionamento aplicado à monitoração de estruturas observa-se que, dentre as que serão tratadas a seguir, as mais preocupantes ainda são: a refração ionosférica e o multicaminhamento.

2.3.1 Geometria satélite receptor, fator DOP

A precisão do posicionamento, além da dependência da precisão (σ_D) da medida de distância entre o satélite o receptor (UERE), também tem correlação com a configuração geométrica dos satélites observados. Esta última se expressa por um escalar denominado DOP, abreviatura da expressão em inglês “Dilution Of Precision” (diluição da precisão). Seu valor é proporcional à quantidade de satélites e à sua distribuição acima do horizonte do observador, sofrendo uma variação rápida no decorrer do dia.

Pode-se associar o erro médio quadrático das componentes (horizontal, vertical, tri-dimensional e temporal) que expressam a posição, ao desvio σ_D através da expressão:

$$\sigma = DOP \cdot \sigma_D \quad 2.3$$

onde:

σ desvio padrão da respectiva componente do posicionamento;

σ_D desvio padrão da distância observada.

Conforme LEICK (1990), o fator DOP pode ser obtido da matriz de covariância dos parâmetros ajustados na solução do posicionamento absoluto. Assim para uma dada estação ter-se-á:

$$Q_x = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} & \sigma_{Xt} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} & \sigma_{Yt} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_Z^2 & \sigma_{Zt} \\ \sigma_{tX} & \sigma_{tY} & \sigma_{tZ} & \sigma_t^2 \end{bmatrix} \quad 2.4$$

onde:

σ_X^2 , σ_Y^2 , σ_Z^2 e σ_t^2 são variâncias das quatro incógnitas: posição da estação, em coordenadas cartesianas geocêntricas X, Y, Z e o erro t de relógio do receptor;

σ_{XY} demais elementos fora da diagonal são as covariâncias.

Pela lei de propagação das covariâncias (LEICK, 1995), pode-se operar a transformação para um sistema de coordenadas geodésicas (φ , λ , h e t):

$$Q_g = \begin{bmatrix} \sigma_\varphi^2 & \sigma_{\varphi\lambda} & \sigma_{\varphi h} & \sigma_{\varphi t} \\ \sigma_{\varphi\lambda} & \sigma_\lambda^2 & \sigma_{\lambda h} & \sigma_{\lambda t} \\ \sigma_{h\varphi} & \sigma_{h\lambda} & \sigma_h^2 & \sigma_{ht} \\ \sigma_{t\varphi} & \sigma_{t\lambda} & \sigma_{th} & \sigma_t^2 \end{bmatrix}. \quad 2.5$$

O fator DOP poderá então ser obtido pela combinação de elementos específicos da diagonal da matriz de covariâncias e expresso em termos das coordenadas geodésicas do ponto, conforme expressões abaixo:

$$\begin{aligned}
HDOP &= \sqrt{\sigma_{\varphi}^2 + \sigma_{\lambda}^2} \\
VDOP &= \sigma_h \\
PDOP &= \sqrt{\sigma_{\varphi}^2 + \sigma_{\lambda}^2 + \sigma_h^2} \\
&= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad . \\
TDOP &= \sigma_t \\
GDOP &= \sqrt{\sigma_{\varphi}^2 + \sigma_{\lambda}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_t^2} \\
&= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

onde:

HDOP relativo à posição horizontal;

VDOP relativo à posição vertical;

PDOP relativo à posição tridimensional;

TDOP relativo à coordenada de tempo e

GDOP relativo à posição e tempo

O fator PDOP pode também ser interpretado como o valor proporcional ao inverso do volume (V) de um tetraedro formado pelos satélites e pelo receptor:

$$DOP = \frac{1}{V} \tag{2.7}$$

A importância do fator DOP consiste em permitir avaliar a influência da geometria sobre o posicionamento em determinado período e local. Para a precisa determinação de posições tridimensionais, recomenda-se assegurar que as observações se dêem sob condições geométricas mais adequadas, expressas pelo GDOP. A experiência tem demonstrado que valores menores do que quatro produzem melhores resultados.

Existe ainda um outro tipo de fator DOP empregado na análise de resultados obtidos por fase da portadora. É usado como ferramenta para avaliação da variação da geometria durante a sessão. O RDOP ou diluição da precisão relativa é dado por:

$$RDOP = \frac{\sqrt{\Sigma(A^T Q_{DD}^{-1} A)^{-1}}}{\sigma_{\Phi}^2} \quad 2.8$$

onde:

$(A^T Q_{DD}^{-1} A)^{-1}$	matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados;
σ_{Φ}^2	incerteza na medida da dupla diferença;
A	matriz das derivadas parciais da dupla diferença em relação à estação desconhecida;
Q_{DD}	matriz covariância da dupla diferença;
Σ	somatória dos elementos da diagonal da matriz variância-covariância.

2.3.2 Efeitos provocados pela atmosfera

Em Geodésia por satélite faz-se um uso de sinais que, na trajetória entre a fonte no espaço e a estação terrestre, percorrem regiões atmosféricas com diferentes características, experimentando estado variável no espaço e no tempo. Para muitas aplicações de ordem prática é possível descrever estas regiões da atmosfera como se formassem uma estrutura de esferas concêntricas que se caracterizam por diferentes propriedades físicas e químicas. Desta forma são possíveis classificações em camadas, ajustando-as na maioria dos casos às características principais de interesse, conforme se apresenta de uma forma genérica na tabela 2.5.

As características destes diferentes meios resultam em alterações dos sinais em relação à direção de propagação, à velocidade de propagação e à potência, SEEBER (2003). Estes efeitos são indesejáveis nas aplicações geodésicas em que se preferiria manter inalteradas as características físicas dos sinais. Diante da impossibilidade disto se concretizar, resta a necessidade de medir ou modelar o

impacto das influências atmosféricas sobre as distâncias, considerando-o no processo de ajustamento das observações.

TABELA. 2.5: CAMADAS DA ATMOSFERA

Adaptado de: Seeber (2003).

Altitude Km	Temperatura	Ionização	Campo magnético	Propagação	Técnica
100.000 -		Protonosfera			
10.000 -	Termosfera	-----	Magnetosfera	Ionosfera	
1000 -		Ionosfera			Atmosfera superior
100 -	Mesosfera	-----	-----	-----	
10 -	Estratosfera	-----	Dinamosfera	-----	
	Troposfera	Neutrosfera		Troposfera	Atmosfera inferior

Sob estes aspectos é mais adequado adotar a classificação das camadas atmosféricas sob o ponto de vista da propagação, subdividindo-a em: ionosfera e troposfera. A velocidade de propagação do sinal tem extrema importância nos sistemas de mensuração de distância; para melhor definir os princípios que traduzem aquela importância, são apresentados a seguir alguns aspectos físicos básicos.

2.3.2.1 Conceitos sobre ondas eletromagnéticas

No contexto dos métodos de observação em geodésia por satélites serão consideradas aqui apenas as ondas eletromagnéticas. Uma onda eletromagnética é uma frente de energia que se auto propaga no espaço, simultaneamente composta por um campo elétrico e um campo magnético gerados pela oscilação rápida de partículas eletricamente carregadas; suas características e possibilidades de existência podem ser explicadas pela equação de Maxwell, conforme exposto por SEEGER (2003) e LANGLEY (1998). Recomenda-se ainda a leitura de SCHAAL (2006) que apresenta em maior detalhe a conceituação de onda eletromagnética.

Em metrologia, as ondas eletromagnéticas podem ser consideradas como distúrbios do campo eletromagnético no tempo e no espaço. Considerando uma onda periódica, o distúrbio se repete em um ponto fixo após um intervalo de tempo. Esta característica é denominada de *período*, sendo geralmente representado pela letra P. A repetição do distúrbio pode ser interpretada também pela repetição de certa distância constante em um intervalo de tempo fixo; a esta distância dá-se o nome de *comprimento de onda* λ .

A relação entre λ , em metros, a frequência f , em oscilações por segundo ou Hz e a velocidade de propagação v , em metros por segundo, é dada por:

$$v = \lambda \cdot f \quad 2.9$$

A relação entre frequência e período (P) pode ser fornecida por:

$$f = \frac{1}{P} \quad 2.10$$

A parte fracionária de um comprimento da onda periódica denomina-se de *fase* e representa-se por Φ . Em termos do período, esta fase também é representada pela fração t/T , de um período com tempo total T, onde t é uma quantidade de tempo a partir de uma origem arbitrária t_0 . Há ainda a *frequência angular*

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad 2.11,$$

bem como, o número de *propagação de onda*, *número de onda* ou *constante de fase*

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad 2.12$$

Posto isso, para a velocidade de propagação v , valem as seguintes relações:

$$v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{P} = \frac{\omega}{k} \quad 2.13$$

Atribui-se a denominação de onda senoidal a uma onda periódica que pode ser modelada no espaço e no tempo pela respectiva função trigonométrica. Considerando-se somente as ondas que são funções periódicas no tempo, obtém-se a magnitude de uma perturbação (y) no instante de tempo (t) pela equação:

$$y = A \cdot \text{sen} 2\pi \cdot \left(\frac{t}{P} + \Phi_0 \right) \quad 2.14$$

onde:

Φ_0 é a fase da onda no instante $t = 0$ e

A é a magnitude máxima ou *amplitude* de onda.

Na equação acima o termo no parêntesis corresponde à fase num dado instante de tempo t , portanto pode ser estabelecida a relação:

$$\frac{t}{P} + \Phi_0 = \Phi \quad 2.15$$

A expressão $2\pi\Phi$ é denominada de *ângulo de fase* φ . Adicionando-se a frequência angular ω (2.11) à equação 2.14 obter-se-á:

$$y = A \cdot \text{sen} \cdot (\omega t + \varphi_0) \quad 2.16$$

A figura 2.3 mostra a interpretação geométrica da equação 2.16 conforme KAHMEN (1978) *apud* SEEBER (2003).

Em Geodésia por satélite, além da frequência, também é de capital importância a precisa informação do tempo. Recorrentemente há necessidade de se correlacionar a época de eventos comuns observados em estações distintas separadas por até longa distância, dentro de precisões da ordem de 1 micro-segundo (1 μ s). Para que isto possa ocorrer os padrões de frequência devem ter alta estabilidade e isto pode chegar até 1.10^{-15} segundos, durante longos períodos; somente com padrões atômicos conseguiu-lo. O relógio atômico é um sistema oscilador. A contagem dos ciclos do oscilador se dá por meio de contadores ou divisores eletrônicos, gerando uma escala de tempo muito constante.

Para um relógio ideal C_I a relação entre o período do ciclo T_I e a frequência do oscilador pode ser definida por:

$$T_I = \frac{1}{f_I} \quad 2.17$$

Admitindo a estabilidade do oscilador e contando N_I ciclos durante um intervalo de tempo $(t-t_0)$ tem-se uma escala ideal (estritamente uniforme):

$$(t-t_0) = N_I \cdot T_I = \frac{N_I}{f_I} \quad 2.18$$

onde N_I é dado pela integral

$$N_I = \int_{t_0}^t f_I dt = f_I (t - t_0) \quad 2.19$$

que representa o número total de ciclos desde a época inicial t_0 . Na realidade um relógio atômico experimenta efeitos indesejados devido à impossibilidade de manter uma frequência estritamente constante, conforme descreve SEEGER (2003).

Se o número de ciclos N na equação 2.18 for substituído pela fase total Φ referida a uma época inicial t_0 , obter-se-á a relação entre o tempo, a fase e a frequência pela seguinte expressão:

$$t = \frac{\Phi}{f} \quad 2.20$$

A equação (2.20) tem equivalência à (2.10) e pode ser considerada ao se definir a equação de um relógio. Ela proporciona a relação fundamental entre a fase de um processo periódico e a observação do tempo correspondente, sendo essencial para a derivação das equações de observação de mensuração de fase do GPS.

Considerando-se ainda que uma onda eletromagnética possa ter como características os quatro parâmetros: frequência, amplitude, fase e polarização, SEEGER (2003), verifica-se também que estes podem ser modificados de uma forma controlada. Sendo assim diz-se que o sinal é modulado. A modulação torna possível a transmissão de informações; assim, a modulação da fase (*MF*) pode ser empregada para a transmissão de dados, que no caso dos satélites de posicionamento é feita com objetivo de transmitir informações para o usuário, proporcionar técnicas de criptografia e torná-lo menos sensível a interferências. A polarização também é empregada, com objetivo de combater o problema de atenuação ou falha do sinal causada pela rotação de Faraday e pelo campo magnético terrestre, SEEGER (2003) e LANGLEY (1998). No caso do GPS é usada a polarização circular à direita (*RHCP*), definida pela rotação do vetor do campo elétrico no espaço ao longo da direção de propagação.

Como pode ser deduzido do exposto, a velocidade de propagação de uma onda e o tempo são grandezas de importância crítica nos sistemas de mensuração de distância, pois é através do tempo de propagação multiplicado pela velocidade da onda eletromagnética que se obterá a determinação da distância. Se a propagação da onda eletromagnética ocorre no vácuo, a velocidade é a mesma para todas as frequências, ou seja, a velocidade (c) da luz no vácuo se obtém através de:

$$c = \lambda_{vac} \cdot f = \frac{\lambda_{vac}}{P} = \frac{\omega}{k_{vac}} \quad 2.21$$

No caso do posicionamento por satélite os sinais experimentam diferentes meios durante a sua trajetória até a antena do receptor e interagem com as partículas eletricamente carregadas, átomos neutros e moléculas, dispersos na atmosfera, resultando na alteração da direção de propagação; diz-se que são refratados. Em decorrência disto se verifica que o comprimento de uma onda eletromagnética depende também das propriedades do meio onde ocorre a propagação.

O valor numérico para c é adotado por diversos organismos científicos mundiais e, conforme MACCARTHY (2000) *apud* SEEBER (2003), o valor oficial atualmente é: $2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$. A velocidade da luz, para outros meios que não o vácuo, caracteriza-se pelo *índice de refração* n destes meios:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{vac}}{\lambda} = \frac{k}{k_{vac}} \quad 2.22$$

ao invés de n , que é próximo de 1, pode-se optar pela *refratividade*

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad 2.23$$

2.3.2.2 Dispersão, velocidade de fase e velocidade de grupo

Um meio no qual v depende de λ é denominado de *meio dispersivo*. Neste meio, N depende da frequência ou do comprimento de onda. Os efeitos de dispersão

são causados pelas interações eletromagnéticas entre o campo do meio eletricamente carregado e o campo externo da onda que por ele se propaga. SEEGER (2003). Quando a frequência atômica ou de plasma de um meio é próxima daquela da onda penetrante ocorre um efeito de ressonância que gera uma influência dependente de f sobre a velocidade de propagação. A velocidade de dispersão é representada pela expressão:

$$v_d = \frac{dv}{d\lambda} \quad 2.24$$

Em um meio com velocidade de dispersão se verificam diferentes velocidades de propagação para as ondas senoidais (fases) e para grupos de ondas. Deve-se discernir entre:

- a velocidade de propagação da fase de uma onda em particular com comprimento de onda uniforme (velocidade de fase v_ϕ) e
- a velocidade de propagação de um grupo, gerado pela sobreposição de ondas diferentes com distintas frequências (velocidade de grupo v_g).

A relação entre estas duas velocidades é expressa pela fórmula (2.25) cuja derivação completa pode ser obtida em WELLS (1974) apud SEEGER (2003).

$$v_g = v_\phi - \lambda \frac{dv_\phi}{d\lambda} \quad 2.25$$

Em termos do índice de refração a relação (2.24) pode ser expressa por:

$$n_g = n_\phi + f \frac{dn_\phi}{df} \quad 2.26$$

onde:

$$n_\phi = 1 + \frac{Cn_e}{f^2} \quad 2.27$$

e n_e corresponde à densidade de elétrons, sendo expresso em número de elétrons por

m^3 ou por cm^3 e C é uma constante, a qual, no caso de n_e estar expresso em m^3 e f em Hz, tem valor de 40.3.

Em geodésia por satélite há necessidade de se verificar de forma adequada, para cada sinal observado, a aplicação da velocidade de grupo e da velocidade de fase. A ionosfera é um meio dispersivo para as microondas e a troposfera não o é. No posicionamento por satélite a propagação dos sinais de código é afetada pela velocidade de grupo, visto que, os códigos são caracterizados por grupos de ondas. O efeito produzido na distância satélite receptor corresponde a um aumento, pois o sinal é atrasado. A propagação das portadoras é afetada pela velocidade de fase e o efeito na distância corresponde a uma diminuição desta, pois, a velocidade de fase aumenta.

2.3.2. 3 Domínio das frequências

O espectro de frequências de ondas eletromagnéticas estende-se por uma faixa com aproximadamente 20 ordens de magnitude entre 10^{-16} a 10^6 metros, conforme visto na figura 2.4. Em geodésia por satélite empregam-se apenas dois segmentos deste domínio; um no espectro de luz visível ao olho humano, que pode variar de $0,4$ a $0,8 \cdot 10^{15}$ Hz e outro em microondas na faixa de 10^7 a 10^{10} Hz.

Na tabela 2.6 são apresentados os prefixos e símbolos de ordem de magnitude empregados no Sistema Internacional de Unidades para designar grandezas, entre elas as frequências e comprimentos de onda.

TABELA. 2.6: PREFIXOS, SÍMBOLOS E ORDENS DE MAGNITUDE.

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Exa>

10ⁿ	Prefixo	Símbolo	Longa escala	Designação europeia	Equivalente decimal
10 ²⁴	<i>yotta</i>	Y	Septilhão	Quadrilião	1 000 000 000 000 000 000 000 000
10 ²¹	<i>zetta</i>	Z	Sextilhão	Milhar de trilhão	1 000 000 000 000 000 000 000
10 ¹⁸	<i>exa</i>	E	Quintilhão	Trilhão	1 000 000 000 000 000 000
10 ¹⁵	<i>peta</i>	P	Quadriilhão	Milhar de bilhão	1 000 000 000 000 000
10 ¹²	<i>tera</i>	T	Trilhão	Bilhão	1 000 000 000 000
10 ⁹	<i>giga</i>	G	Bilhão	Milhar de milhão	1 000 000 000
10 ⁶	<i>mega</i>	M	Milhão	Milhão	1 000 000
10 ³	<i>quilo</i>	k	Milhar	Milhar	1 000
10 ²	<i>hecto</i>	h	Centena	Centena	100
10 ¹	<i>deca</i>	da	Dezena	Dezena	10
10 ⁰	<i>n/a</i>	n/a	Unidade	Unidade	1
10 ⁻¹	<i>deci</i>	d	Décimo	Décimo	0,1
10 ⁻²	<i>centi</i>	c	Centésimo	Centésimo	0,01
10 ⁻³	<i>mili</i>	m	Milésimo	Milésimo	0,001
10 ⁻⁶	<i>micro</i>	μ	Milionésimo	Milionésimo	0,000 001
10 ⁻⁹	<i>nano</i>	n	Bilionésimo	Milésimo de milionésimo	0,000 000 001
10 ⁻¹²	<i>pico</i>	p	Trilionésimo	Bilionésimo	0,000 000 000 001
10 ⁻¹⁵	<i>femto</i>	f	Quadrilionésimo	Milésimo de bilionésimo	0,000 000 000 000 001
10 ⁻¹⁸	<i>atto</i>	a	Quintilionésimo	Trilionésimo	0,000 000 000 000 000 001
10 ⁻²¹	<i>zepto</i>	z	Sextilionésimo	Milésimo de trilionésimo	0,000 000 000 000 000 000 001
10 ⁻²⁴	<i>yocto</i>	y	Septilionésimo	Quadrilionésimo	0,000 000 000 000 000 000 000 001

As ondas eletromagnéticas podem também ser agrupadas em faixas ou *bandas de frequência* conforme apresentado na tabela 2.7, costumeiramente empregada em tecnologia da informação, ou ainda de acordo com a tabela 2.8, sob a divisão de *bandas radar*, tal como se emprega em geodésia espacial.

TABELA. 2.7: FAIXAS DE FREQUÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS.

Adaptado de Fonseca Junior (2002).

Designação	Faixa de Frequência		Comprimento de onda	
	Inferior	Superior	Inferior	superior
ULF	3 Hz	30 Hz	100 Mm	10 Mm
VF	30Hz	300 Hz	10 Mm	1 Mm
ELF	300 Hz	3 kHz	1 Mm	100 km
VLF	3 kHz	30 kHz	100 km	10 km
LF	30 kHz	300 kHz	10 km	1 km
MF	300 kHz	3 MHz	1 km	100 m
HF	3 mHz	30 MHz	100 m	10 m
VHF	3- MHz	300 MHz	10 m	1 m
UHF	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
SHF	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
EHF	30 GHz	300 GHz	0,75 cm	1 mm
Submilimétrico	300 GHz	3 THz	1 mm	100µm
Infravermelho	3 THz	430 THz	100 µm	700 nm
Visível	430 THz	750 THz	700 nm	400 nm
Ultravioleta	750 THz	30 PHz	400 nm	100 nm
Raio X	30 PHz	3 EHz	100 nm	10 nm
Raio Gama	3 EHz		10 nm	

TABELA. 2.8: FAIXAS DE FREQUÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS, BANDAS RADAR.

Adaptado de Fonseca Junior (2002).

Denominação da banda	Faixa de Frequência	Faixa de comprimento de onda
P	220 – 300 MHz	136 cm - 100 cm
L	1 – 2 GHz	30 cm - 15 cm
S	2 – 4 GHz	15 cm - 7,5 cm
C	4 – 8 GHz	7,5 cm - 3,75 cm
X	8 – 12,5 GHz	3 cm – 2,5 cm
Ku	12,5 – 18 GHz	2,5 cm – 1,67 cm
K	18 – 26,5 GHz	1,67 cm – 1,11 cm
Ka	26,5 - 40 GHz	1,11 cm – 0,75 cm

2.3.2.4 Propagação dos sinais na ionosfera e na troposfera

Os efeitos de propagação dos sinais de microondas nestas duas camadas atmosféricas diferem entre si; enquanto na troposfera a refratividade possui um sinal positivo e até certo ponto é independente da frequência, a ionosfera produz efeitos de sinal negativo e há dependência da frequência do sinal que se propaga. A figura 2.5 mostra o comportamento da refratividade (N) em função da altitude; verifica-se que para a ionosfera poder-se-ia aumentar a precisão das medidas com a elevação da frequência, entretanto, devem ser observadas duas limitações:

1. Altas frequências demandam uma tecnologia muito mais complexa e onerosa para o atual padrão tecnológico. No atual estágio valores acima de 10 GHz não são facilmente disponíveis.
2. Com as altas frequências também ocorre o aumento da absorção pela troposfera com a ocorrência de chuvas; sinais acima de 1 GHz experimentam considerável atenuação nestas circunstâncias.

Os efeitos acima apontados se refletem diretamente nos modernos projetos de satélites de posicionamento exigindo o uso de mais de uma frequência para que os erros possam ser atenuados. Por causa dos comportamentos diferentes nas duas

camadas, a propagação dos sinais e seus efeitos são usualmente tratados em tópicos separados.

2.3.2.5 Troposfera

A troposfera é a camada inferior da atmosfera que tem início na superfície terrestre e se prolonga em altitude. Sua espessura pode variar desde 9 km nas regiões polares até aproximadamente 40 km nas proximidades do equador. Pode-se dizer que, de forma significativa, esta camada é desprovida de partículas eletricamente carregadas e os elementos nela contidos estão bem misturados, compondo um gás neutro. No seu interior a propagação dos sinais é afetada principalmente pela temperatura e pelo conteúdo de vapor de água. A temperatura possui um gradiente vertical de 6,5°C/km, tendendo a valores baixos à medida que se distancia da superfície; o gradiente horizontal varia de poucos graus a cada 100 km. Fora das camadas muito próximas da superfície terrestre ou de grandes objetos, o índice de refração é ligeiramente maior que 1, tendendo para 1 na medida em que se eleva em altitude e chega-se ao limite da camada; o que corresponde à diminuição da densidade do gás, haja vista que aproximadamente 90% da massa atmosférica concentram-se nos primeiros 16 km após a superfície terrestre e que 99% daquela ficam retidos nos primeiros 30 km. A troposfera não constitui um meio dispersivo para frequências até 30 GHz, portanto os sinais que por ela atravessam são afetados de forma semelhante.

A refratividade troposférica (N_T) pode ser descrita em função de parâmetros meteorológicos aplicados a uma fórmula empírica referida como fórmula de Smith-Weintraub, que pode ser decomposta em uma componente seca (N_s) ou hidrostática e outra úmida (N_u), tendo por expressão:

$$N_T = N_s + N_u = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad 2.28$$

onde:

P é a pressão do ar, em Hectopascal (hPa);

T é a temperatura, em graus Kelvin (K) e

e pressão parcial do vapor de água em Hectopascal.

No caso de N_s , o efeito é provocado principalmente pela quantidade de nitrogênio e oxigênio. A componente úmida N_u é o resultado do conteúdo de vapor de água na atmosfera. Este pode ser medido com sistemas de observação de vapor de água, baseados em terra ou no espaço; estes últimos ainda estão em estágio de pesquisa. Por outro lado, existe a possibilidade do uso de radiômetros de vapor d'água, mas o custo para obtenção destes dados ainda é bastante elevado para muitas das aplicações de posicionamento.

A integração do atraso troposférico ao longo do trajeto percorrido pela onda entre o receptor r e o limite superior A daquela camada, proporcionaria a influência total sobre a medida da distância satélite receptor. A integral pode ser resolvida quando se conhece o comportamento da refratividade ao longo do trajeto. As componentes seca e úmida são separadas porque se referem a níveis distintos (H_s e H_u) da camada até A :

$$\Delta s_T = 10^{-6} \int_r^A N_T ds = \Delta s_s + \Delta s_u = 10^{-6} \int_r^{H_s} N_s ds + 10^{-6} \int_r^{H_u} N_u ds \quad 2.29$$

A medida direta da refratividade ao longo do trajeto de propagação é inviável, sendo esta a razão do desenvolvimento de diversos modelos com os quais se procura descrever o comportamento da refratividade. Em geral são usados como parâmetros os dados meteorológicos nas proximidades dos locais de observação. As pesquisas básicas foram desenvolvidas por Hopfield na década de 60, resultando no modelo que leva o seu nome, válido até os dias atuais, com algumas modificações.

Sob considerações teóricas verifica-se que a componente seca possui a seguinte função de quarto grau dependente da altura sobre a superfície terrestre.

$$N_s(h) = N_{s0} \left(\frac{H_s - h}{H_s} \right)^4 \quad 2.30$$

onde:

N_{s0} é a refratividade N_s na superfície na fórmula 2.27;

h é a altura acima da superfície terrestre;

O expoente quatro e o parâmetro H (metros) foram definidos por Hopfield, com uso de dados coletados com balões ao redor do globo terrestre, chegando ao seguinte valor:

$$H_s = 40.136 + 148,72(T - 273,16) \quad 2.31$$

Nesta teoria, parte-se dos seguintes pressupostos:

- a temperatura decresce com a altura na razão de 6,71 C°/km;
- a atmosfera apresenta o comportamento de um gás ideal;
- a atmosfera é constituída de camadas esféricas superpostas e
- a refratividade não se altera no tempo.

A componente úmida não sofreu um tratamento equivalente; na prática permanece o emprego da seguinte função:

$$N_u(h) = N_{u0} \left(\frac{H_u - h}{H_u} \right)^4 \quad 2.32$$

onde se adota o valor médio de 11.000 m para H_u .

A integração da equação (2.29) ao longo do trajeto curvo percorrido pelo sinal é muito difícil. Por esta razão são feitas diversas simplificações e a linha de visada é considerada retilínea.

O modelo desenvolvido por Helen Hopfield apresenta o seguinte algoritmo:

$$\Delta_{s_r} = \frac{K_s}{\text{sen}(E^2 + 6,25)^{\frac{1}{2}}} + \frac{K_u}{\text{sen}(E^2 + 2,25)^{\frac{1}{2}}} \quad 2.33$$

onde:

$$K_s = 155,2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{P}{T} H_s \quad \text{e} \quad K_u = 155,2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{4.810e}{T^2} H_u.$$

Nestas expressões K_s e K_u descrevem o efeito total da refração troposférica na direção zenital e E é a elevação em graus do satélite em relação ao plano do observador. Os divisores de K_s e K_u , são as chamadas funções de mapeamento que

relacionam o atraso das componentes hidrostática e úmida com o ângulo de elevação. Conforme MONICO (2005), aproximações na forma $1/\sin(E)$ podem ser suficientes para ângulos próximos ao zênite; entretanto, para ângulos de elevação menores isto não ocorre e há necessidade de modelos mais adequados que possam proporcionar maior precisão, citando dentre eles o de Chao e o de Davis.

Em consequência da refração troposférica a distância ótica, medida entre o observador e o satélite, se apresenta maior do que a distância geométrica. Com ângulos de elevação menores do que 10° as observações podem facilmente apresentar efeitos superiores a 10 m. Observa-se também que a componente úmida atinge aproximadamente 10% do valor total dos efeitos da troposfera. Em resumo, para melhor informar sobre a questão, apresenta-se a tabela 2.9 contendo alguns valores dos efeitos da componente hidrostática (Δs_d), úmida (Δs_u) e total (Δs_T), em função de $T = 15^\circ \text{ C}$ e $K_u = 0,20$ e diferentes ângulos de elevação.

TABELA 2.9: INFLUÊNCIA DA REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA SOBRE DISTÂNCIAS MEDIDAS (m).

Adaptado de: Seeber (2003).

E	90°	20°	15°	10°	5°
Δs_d	2,31	6,71	8,81	12,91	23,61
Δs_u	0,20	0,58	0,77	1,14	2,21
Δs_T	2,51	7,29	9,58	14,04	25,82

O valor da influência da componente seca possui um desvio padrão entorno de 2%, que corresponde a 4 cm na direção zenital, considerando-se que a atmosfera é um gás ideal, mas pode chegar até 15%. Para a componente úmida, que apresenta maior complexidade devido à dificuldade em se determinar a temperatura e pressão do vapor d'água ao longo do trajeto, o modelo apresenta na direção zenital valores com um desvio padrão entorno de 10% a 20%. Em condições meteorológicas estáveis o conteúdo do vapor de água da atmosfera apresenta alta correlação regional numa extensão horizontal de 50 km. Nestas condições os efeitos sistemáticos são semelhantes e para estações adjacentes se minimizam.

Em estações adjacentes que experimentem um desnível acentuado (~300 m) as condições deixam de ser semelhantes e se faz necessário providenciar a determinação de T e P para as medições de alta precisão. Usualmente os parâmetros adotados pelos modelos são suficientes e preferíveis à introdução de medidas com baixa acurácia.

Ao longo das últimas décadas, vários pesquisadores desenvolveram algoritmos e funções de mapeamento adicionais ao de Hopfield. Para maior profundidade sobre o assunto recomenda-se principiar por pesquisar em MONICO (2005), SEEBER (2003), LANGLEY (1998), SPILKER (1996).

2.3.2.6 Comportamento da Ionosfera

A ionosfera é uma camada alta da atmosfera, que pode principiar em altitudes no de 50 Km. Nela a radiação ionizante, gerada principalmente pelas emissões ultravioletas e raios-X do sol, é a causa da existência de elétrons em quantidade suficiente para afetar a propagação de ondas eletromagnéticas. Na figura 2.6 pode-se observar o *perfil de Chapman* indicando o número de íons produzidos em função da altitude e mostrando um máximo na sua taxa de produção. A forma exata e valores numéricos deste perfil não são dispostos no gráfico devido à dependência de diversos parâmetros, os quais são funções extremamente variáveis.

A geração de elétrons e íons é proporcional à intensidade de radiação solar e à densidade de plasma. A distribuição espacial destas partículas é predominantemente uma função de dois processos: o fotoquímico e o de transporte. O primeiro depende do processo de insolação, influenciando na produção e na taxa de decomposição de partículas ionizadas, e o segundo é devido às correntes de elétrons formadas pelo campo geomagnético, causa da movimentação das camadas ionizadas. Os dois processos criam camadas de gases ionizados em diferentes altitudes e posições; as quatro principais camadas estão descritas na tabela 2.10. A *densidade de elétrons* (n_e) descreve o estado da ionosfera.

A variação da insolação influi no comportamento das camadas ao longo do dia, bem como o campo geomagnético e as posições da Terra em sua órbita provocam efeitos diversos.

TABELA 2.10 :CAMADAS DA IONOSFERA

Adaptado de: Seeber (2003).

Camada	D	E	F1	F2
Faixa de altitude (Km)	60-90	85-140	140-200	200-1000
n_e ao dia	10^2 - 10^4	10^5	5×10^5	10^6
n_e à noite	----	2×10^3	5×10^4	3×10^5

O efeito da ionosfera sobre o sinal depende do conteúdo eletrônico total (TEC) ao longo do caminho que o mesmo percorre, onde:

$$TEC = \int_S^R n_e(s) ds \quad 2.34.$$

Esta integral estabelece a quantidade total de elétrons ao longo do trajeto s percorrido entre o satélite S e o receptor R , considerando uma seção transversal de 1 m^2 . O conteúdo eletrônico pode variar entre 10^{16} e 10^{19} elétrons por m^2 ao longo do trajeto da onda. A densidade de elétrons é altamente variável e depende principalmente de fatores, tais como:

- localização geográfica;
- hora do dia;
- estação do ano e
- atividade solar

FONSECA JUNIOR (2002), analisando dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) observou que o Conteúdo Eletrônico Total (TEC) apresenta um máximo após às 14:00 horas locais e outro após às 22:00, sendo o último associado ao fenômeno das cintilações. Além das variações diárias aquele autor verificou dois períodos de maior intensidade durante o ano: março/abril e setembro/outubro coincidindo com os equinócios no movimento da Terra ao redor do Sol.

A ionosfera representa uma particularidade na região sul-americana. Além das emissões solares associadas a fenômenos, tais como: explosões solares, “buracos” da coroa solar e manchas solares, os quais têm influência em ciclos de 80, 22 e 11 anos na alta atividade solar (figura 2.7), aquela região sofre continuamente os efeitos devidos à proximidade com o equador geomagnético (figura 2.8). Esta região, compreendida em uma faixa $\pm 30^\circ$ ao longo daquela linha está ainda sujeita aos efeitos de cintilações, causa de rápida variação em amplitude e fase dos sinais. A ocorrência é mencionada na literatura como sendo entre o princípio da noite até próximo das 24 horas locais.

Posicionamentos realizados com muita frequência pelo autor no Brasil, sugerem que os efeitos da atividade ionosférica tendem a ser mais pronunciados em observações realizadas após às 17 horas locais, perdurando por um período que se

estende além da primeira hora do dia seguinte. Verificam-se seus efeitos mesmo nos dados derivados de receptores de duas frequências que também podem apresentar dificuldades na fixação das ambigüidades e conduzem a resultados com maior ruído nas observações de fase.

Portanto, em resumo e enfatizando o potencial perturbador e aleatório representado para os sinais dos satélites, os efeitos da refração ionosférica são dependentes da frequência, da posição geográfica, do tempo, da atividade solar e do campo geomagnético terrestre. Esta variabilidade torna difícil a modelagem e a previsão dos efeitos sobre os sinais.

Contudo, pelo conhecimento da densidade eletrônica, pode-se calcular uma correção aproximada para o atraso na propagação do sinal. Diferentes modelos para estimativa de n_e foram desenvolvidos, alguns deles muito sofisticados. No posicionamento por tecnologia GPS emprega-se usualmente o modelo de Klobuchar que possui a capacidade de corrigir até 50% dos efeitos ionosféricos. Entretanto, correções mais eficientes são processadas quando da observação simultânea de sinais em duas frequências.

2.3.2.7 Efeitos ionosféricos sobre os sinais

A influência da ionosfera sobre a propagação do sinal no domínio da rádio frequência se caracteriza principalmente pela dispersão. Através de um desenvolvimento em série, SEEGER (2003), pode-se representar o coeficiente de refração que descreve a propagação da fase por:

$$n_{\phi} = 1 + \frac{C_2}{f^2} + \frac{C_3}{f^3} + \frac{C_4}{f^4} + \dots \quad 2.35.$$

Os coeficientes C_i independem da frequência f da portadora, contudo através da densidade de elétrons n_e dependem do estado da ionosfera. O coeficiente C_2 foi estimado em $-4,3 n_e$. Assim se obtém a seguinte relação aproximada:

$$n_{\Phi} = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2} \quad 2.36$$

O coeficiente de refração para um grupo de ondas pode ser obtido pela equação (2.35) a partir da derivada primeira de (2.34)

$$\frac{dn}{df} = -\frac{2C_2}{f^3} - \frac{3C_3}{f^4} - \frac{4C_4}{f^5} - \dots \quad 2.37$$

que substituída na (2.25) fornece

$$n_g = n_{\Phi} - \frac{2C_2}{f^2} - \frac{3C_3}{f^3} - \frac{4C_4}{f^4} - \dots \quad 2.38$$

A substituição de (2.36) em (2.38) leva à expressão final:

$$n_g = 1 - \frac{C_2}{f^2} - \frac{2C_3}{f^3} - \frac{3C_4}{f^4} - \dots \quad 2.39.$$

Verifica-se que o coeficiente n_g é maior que 1, o que implica em menor velocidade relativa à medida de fase (2.25), determinando-se por isso, com os códigos, uma distância maior. Atendo-se somente ao termo de primeira ordem e substituindo o valor de C_2 na equação acima:

$$n_g = 1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \quad 2.40$$

Comparando as equações (2.35) e (2.39) pode-se concluir que tanto para as observações de fase quanto para as de código os efeitos são próximos em magnitude, mas possuem sinais contrários. Esta propriedade pode ser explorada no processamento de dados quando se tem disponíveis os dois tipos de observação.

A integração sobre todo o trajeto (s) percorrido pelo sinal em sua propagação proporciona o efeito total da refração ionosférica sobre a distância medida com o código (D):

$$\delta D_{ion} = \int_s (n_g - 1) ds \quad 2.41$$

$$\delta D_{ion_g} = \frac{40,3}{f^2} \int_s n_e ds \quad 2.42$$

A expressão correspondente para a medida de fase da portadora é:

$$\delta D_{ion_\Phi} = -\frac{40,3}{f^2} \int_s n_e ds \quad 2.43$$

A integral desconhecida pode ser determinada pela medição de distâncias (D) nas frequências L1 e L2:

$$D = D_{L1} - \delta D_{L1,ion}, \quad D = D_{L2} - \delta D_{L2,ion} \quad 2.44$$

Fazendo as substituições de (2.42) em (2.44) e omitindo-se os subscritos g e Φ , por simplicidade de expressão, chega-se à equação da correção ionosférica na distância medida pelo código em L1, derivada de medidas em dupla frequência:

$$\delta D_{L1,ion} = \frac{D_{L1} - D_{L2}}{1 - \left(\frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2} \right)} = \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} (D_{L2} - D_{L1}) \quad 2.45$$

Devido à aproximação em (2.40) a equação acima é chamada de *correção de primeira ordem da refração ionosférica*. Os erros remanescentes atingem alguns centímetros (ver tabela 2.11). Consequentemente, com observações de dupla frequência, os efeitos ionosféricos podem ser modelados em sua maior parte. Na tabela 2.11 podem ser verificadas estimativas para simples e dupla frequência na direção vertical. Para direções inclinadas a influência aumenta, pois o valor de TEC pode aumentar em até três vezes à medida que diminui a elevação do satélite, SEEGER (2003).

TABELA 2.11 - EFEITOS IONOSFÉRICOS SOBRE AS DISTÂNCIAS SATÉLITE RECEPTOR.

Adaptado de: Seeber (2003) e Fonseca Junior (2002).

	Sinal	Efeito médio	Efeito médio para 90% dos casos menores que o efeito máximo	Efeito máximo
<i>Simple freq.</i>	1,6 GHz.	3m	15 m	30 m
<i>Dupla freq.</i>	1,227 GHz. E 1,572 GHz.	0,003m	0,017 m	0,045 m

Conforme WELLS (1987), a equação correspondente à (2.44) para as observações de fase da portadora é dada por:

$$\delta\Phi_{ion}(L1) = \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \left(\Phi(L1) - N(L1) - \frac{f_{L1}}{f_{L2}} (\Phi(L2) - N(L2)) \right) \quad 2.46$$

onde:

$N(L1)$ e $N(L2)$ são os termos de ambigüidade para $L1$ e $L2$, respectivamente.

A equação acima descreve o avanço ionosférico de fase para observações da portadora $L1$. Combinando as observações de dois sinais se obtém a *combinação linear livre de efeitos da ionosfera (ionospheric free linear combination)*:

$$\Phi(L0) = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \Phi(L1) - \frac{f_{L1}f_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \Phi(L2) \quad 2.47$$

A combinação livre dos efeitos ionosféricos tem também sido mencionada por alguns autores como a observável L3.

Estas correções dos efeitos da ionosfera somente podem ser modeladas com observação de dupla frequência. Havendo disponibilidade de sinais em uma frequência apenas, resta a alternativa de se determinar a correção dos efeitos por modelo, usualmente o de Klobuchar. Estudos com maior nível de detalhes em relação aos efeitos atmosféricos e suas correções por modelo podem ser obtidos em HOFMANN-WELLENHOF (1992), LEICK (1995), PARKINGSON (1996), LANGLEY (1998), FONSECA JUNIOR (2002), SEEBER (2003) e MONICO (2005) e SHAAL (2006).

2.3.3 Reflexão, difração e interferência dos sinais

O multicaminhamento, ou seja, sinais multi refletidos em superfícies (figura 2.9), antes de atingir a antena do receptor, ainda que com a polarização à direita, constituem outra fonte de erro que afeta diretamente a determinação de coordenadas no posicionamento, sendo dependente do local e das superfícies no entorno que possam causar a reflexão. Estas superfícies podem ser chapas metálicas (veículo), entre outras fontes. Podem estar dispostas de forma horizontal, vertical ou inclinadas.

O multicaminhamento em casos extremos pode causar perda de travamento de sinal no receptor e produzir perdas de ciclo. Os efeitos provocam erros maiores nas observações dos códigos do que da portadora e prejudicam proporcionalmente a combinação linear. O sinal recebido diretamente e o sinal refletido podem ser representados de forma simplificada pelas expressões:

$$A_d = A \cos \Phi_d, \quad A_r = \alpha A \cos(\Phi_d + \Phi) \quad 2.48$$

onde:

A_d é a amplitude do sinal direto, em m;

A_r é a amplitude do sinal refletido em m;

α é o fator de amortecimento ($0 \leq \alpha \leq 1$);

0 quando sem reflexão,

1 sinal refletido, forte como o direto;

Φ_d fase do sinal direto e

Φ deslocamento de fase, do sinal refletido, em relação ao sinal direto

A sobreposição de ambos conduz à expressão:

$$A_{\Sigma} = A_d + A_r = A \cos \Phi_d + \alpha A \cos(\Phi_d + \Phi) = \beta A \cos(\Phi_d + \Theta) \quad 2.49.$$

Com $A_{d,max} = A$, e $A_{r,max} = \alpha A$, resulta que a equação para o erro de multicaminhamento resultante (Θ) na fase da portadora observada será:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\sin \Phi}{\alpha^{-1} + \cos \Phi}\right) \quad 2.50,$$

A amplitude do sinal pode ser expressa por:

$$B = A\sqrt{1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \Phi} \quad 2.51$$

Pode-se verificar que para $\alpha = 1$, caso mais desfavorável - quando o maior valor de Θ é 90° - o erro no sinal L1 (comprimento de onda de 0,1905 m) atinge aproximadamente 0,05 m. A propagação de Θ para as duas frequências gera valores correspondentemente maiores ou menores. Conforme SEEBER (2003) a propagação na altitude pode chegar à casa de 0,15 m.

Os efeitos são cíclicos e podem ser atenuados com um tempo de observação maior do que o período necessário para completar um ciclo (tipicamente entre 15 e 30 minutos). Contudo, isso não é possível para os métodos cinemático e estático rápido, os quais se baseiam em uma ocupação de um ponto por curto período de tempo. A figura 2.10 mostra efeito de reflexão sobre a determinação da altitude geodésica pelo método cinemático, estando o receptor em repouso, onde se deve observar as variações cíclicas centimétricas.

Estes efeitos são preocupantes no caso de monitoração de estruturas devido ao ambiente propício ao multicaminhamento que nelas se apresenta.

Este mesmo ambiente influencia de outro modo a recepção do conjunto necessário de satélites, dificultando a obtenção de adequada geometria (Geometric Dilution of precision GDOP). Com efeito, os sinais podem ser bloqueados, refletidos ou refratados pelos elementos da estrutura, alterando o conjunto de satélites de forma diferente em cada ponto.

A preocupação com o multicaminhamento deve ser maior ainda nas estações de base do conjunto de receptores em observação devido à propagação dos efeitos para a posição do receptor móvel.

As medidas para redução dos efeitos podem ser tomadas ao nível do projeto da rede de pontos, do projeto de receptores, dos programas e da calibração da estação.

A primeira deve considerar a escolha de pontos em locais mais adequados, o uso de antenas providas com plano terra e dispositivo que atenua os efeitos dos sinais

refletidos (choke ring), entre outras providências. A segunda está no âmbito da escolha de equipamentos e programas que proporcionem técnicas de mitigação, que podem ser baseadas na polarização dos sinais e na diferença de tempo de propagação, pois o sinal refletido chega atrasado à antena em relação ao sinal direto e, por isso, pode ser discriminado.

A terceira requer a calibração dos efeitos de multicaminhamento na estação, que deve ser realizada em várias etapas, detectando e avaliando seus efeitos cíclicos para em uma etapa seguinte proceder à calibração da estação. Recentemente se tem pesquisado uma técnica que faz emprego de uma antena calibrada acoplada a um robô, próximo à estação. O robô de alta precisão nos movimentos gira e altera rapidamente a posição vertical da antena sobre o ponto, vide figura 2.11. Baseado no fato de que em dado local o multicaminhamento se repete na mesma hora sideral, faz-se uma análise destas repetições, em conjunto com as variações de centro de fase da antena calibrada, sendo possível corrigir as observações futuras naquele local, SEEBER (2003).

Experimentos com a simulação de sinais L5 feitos por LAU e CROSS (2003) demonstram que os resultados provenientes do processamento com três frequências e técnicas de detecção e rejeição de multicaminhamento podem apresentar resultados 50% mais precisos do que os produzidos somente com sinal L1.

Langley (1998) bem como Seeber (2003) discorrem rapidamente sobre potenciais efeitos da difração, fenômeno associado ao multicaminhamento dos sinais. O fenômeno da difração ocorre quando o sinal é obstruído, porém uma fração da frente de onda é recebida pelo receptor, conforme esquema geométrico na figura 2.12. Observa-se na figura que nas regiões A, B e C se recebe diretamente os sinais, mas na região D, somente o sinal difratado

O primeiro autor reporta que os erros dependem da elevação do satélite e variam lentamente no tempo, não cancelando necessariamente com repetição das sessões de observação, bem como longa distância, introduzindo erros sistemáticos no nível do centímetro na estimativa de todos os parâmetros, inclusive nas coordenadas. Relata ainda que tais efeitos foram observados em antenas instaladas em pilares.

Os sinais também podem sofrer interferências intra e extra banda, decorrente da técnica de espalhamento do espectro empregada para os códigos que espalham o sinal em uma faixa de 2,046 MHz para o código C/A e 20,46 MHz para o código P, portanto, os sinais não são discretos e podem sofrer interferências de fontes externas

nas proximidades das referidas frequências, mesmo que se empregue técnicas para minimizar este efeito na recomposição do sinal (ver LANGLEY (1998) e SEEGER (2003)). As interferências ocorrem preferencialmente na L2 e podem ser causadas por:

- fontes transmissoras de VHF, UHF e de TV com grande potência e localizadas a distâncias de até 500 m;
- transmissores direcionais “digipeater” de rádio amadores;
- radares para controle de voo a distâncias de até 20 km
- cabos de alta voltagem a uma distância de até 10 m e
- telefones celulares.

Outro fator que deve ser lembrado, embora possa vir a ter menor ocorrência no caso de monitoramento de estruturas, é o bloqueio ou a atenuação do sinal provocado por cobertura vegetal. Isto ocorre particularmente quando da observação das portadoras, ocorrendo demasiadas perdas de ciclo.

2.4 Classificação do posicionamento relativo

Existem diversos métodos de posicionamento geodésico com emprego da tecnologia GPS; todos têm por princípio a medida da distância entre o satélite e o receptor. Os principais métodos são resumidos no esquema abaixo.

ABSOLUTO	CÓDIGO	SOLUÇÃO DE NAVEGAÇÃO		
	PORTADORA	DOPPLER PPP PRECISE POINT POSITIONING		
RELATIVO	CÓDIGO	DGPS	CORR. POSIÇÃO CORR. DISTÂNCIA PELO CÓDIGO CORR. DISTÂNCIA PELO CÓDIGO SUAVIZADO PELA PORTADORA	
		FASE DO CÓDIGO		
	PORTADORA	ESTÁTICO	BASE SIMPLES SOLUÇÃO EM REDE RELAXAÇÃO ORBITAL PSEUDOCINEMÁTICO OU REOCUPAÇÃO RÁPIDO-ESTÁTICO	
		CINEMÁTICO	STOP AND GO (semi-cinemático)	INICIAÇÃO POR TROCA DAS ANTENAS INICIAÇÃO BASE SIMPLES INICIAÇÃO PONTO CONHECIDO
			CINEMÁTICO COM INICIALIZAÇÃO	
			CINEMÁTICO PURO (OTF)	

A classificação pode seguir diversos critérios:

1. tendo em conta a existência ou não de um ponto com as coordenadas conhecidas para ser utilizado como referência:
 - sem ponto de referência: absoluto;
 - com ponto de referência: diferencial e relativo;
2. tendo em conta o tipo de observação:
 - distância obtida pelo código;
 - distância obtida pela fase da portadora;
 - distância obtida pela combinação de ambos: código e portadora;
3. considerando tempo empregado na observação:
 - longo tempo observacional: Doppler e estático;
 - curto tempo observacional: estático-rápido, semi-cinemático (stop and go) e cinemático.
 - em tempo real: DGPS, RTK.

Neste trabalho é descrito, nos seus princípios gerais, o método relativo cinemático (em destaque no quadro acima) diretamente voltado para o posicionamento geodésico e topográfico também de interesse para esta pesquisa de monitoração de estruturas com carga dinâmica; os outros métodos podem ser encontrados em SEEBER (2003), LEICK (1995) ou ainda BUENO (1995).

2.4.1 Posicionamento Relativo Cinemático

2.4.1.1 Introdução

Quando se tornou rotineira a determinação de vetores (linhas de base) com extensão de vários quilômetros e obtenção de precisões no nível de centímetros com o posicionamento relativo estático, observando-se por apenas algumas horas, a metodologia GPS foi tida como algo muito produtivo em relação aos clássicos métodos geodésicos. Mas, a obtenção de posicionamento em distâncias mais curtas, com a mesma metodologia, ainda não poderia ser considerada suficientemente produtiva para competir com os métodos clássicos, baseados na observação de ângulos e distâncias com taqueômetros eletrônicos ou as estações totais, com os quais em certas circunstâncias se produziam até cerca de 1000 pontos por dia. Esta

lacuna na metodologia GPS motivou pesquisas visando um posicionamento relativo mais rápido que proporcionasse precisão de centímetros com poucos segundos de observação.

O desenvolvimento de um método que atendesse tal necessidade contou com o pioneirismo de Benjamin W. Remondi, em 1982, surgido em decorrência de debates com outros pesquisadores do National Geodetic Survey a respeito da determinação da trajetória de aviões, observando-se a fase de batimento da portadora.

Das pesquisas conduzidas por Remondi adveio um método de levantamento que possibilitou a observação em curto período de tempo, conhecido na terminologia inglesa como “*stop and go surveying*”, conforme MINKEL (1989) apud WELLENHOF (1992). Nestes primeiros métodos fazia-se necessário empregar técnicas de observação para proporcionar a solução de ambigüidades para, somente então, prosseguir com o levantamento. As técnicas observacionais para proporcionar a solução de ambigüidades no semi-cinemático são denominadas de iniciação e podem ser classificadas em três tipos:

- a troca de antenas, que se processa enquanto são dois receptores (A e B) próximos um do outro (1 a 2m) observam por um minuto. No momento seguinte, sem desligar os aparelhos, trocam-se as antenas de estação, passando a de B para a posição de A e vice versa. Em seguida observa-se por mais um minuto e voltam-se as antenas às posições originais, permanecendo estáticas por mais um minuto. Deste momento em diante, sem desligar os receptores, procede-se ao levantamento;
- a execução de uma linha de base simples no método estático, feita previamente ao levantamento e com a menor distância possível. Findo o período desta primeira sessão prossegue-se com os receptores ligados;
- a reocupação de um ponto já determinado, aguardando-se um período adequado para que possam ser resolvidas as ambigüidades, antes de prosseguir.

Estes procedimentos foram empregados no princípio tanto para receptores de uma como de duas frequências, sendo ainda necessário para receptores do primeiro tipo, mas com maior eficiência do que no passado.

O aprimoramento de novos modelos de solução de ambigüidades e o desenvolvimento de processadores com baixo nível de ruído na aquisição dos sinais,

capazes de realizar observações com desvios proporcionais a um milésimo do comprimento de onda, possibilitou o desenvolvimento de um método *puramente cinemático*, onde não se requer necessariamente que o receptor móvel mantenha-se estático por um período inicial.

Vários estudos foram desenvolvidos ao longo dos anos visando métodos mais rápidos e eficientes. Dentre estes, destacam-se os que possibilitam a resolução da ambigüidade em movimento (“on the fly” ou “on the way”) e conhecida na literatura pela sigla OTF.

Diferente do método estático que produz uma posição, o semi cinemático e o puramente cinemático têm a característica de proporcionarem a trajetória da antena móvel formada por várias posições. Esta capacidade, aliada à resolução da ambigüidade em movimento, qualifica o posicionamento relativo puramente cinemático ou simplesmente cinemático como o método de maior interesse na aplicação à monitoração de estruturas com carga dinâmica. Neste método destaca-se a técnica de combinação da fase de batimento da portadora com os códigos.

2.4.1.2 Cinemático

As atividades de levantamento topográfico, locação de obras, navegação precisa, agricultura e monitoramento de estruturas, entre outras, requerem o conhecimento da trajetória de objetos móveis, com precisão centimétrica, ou melhor; a tabela 2.12 dá alguns exemplos. Ao se tornar viável esta capacidade abre-se um leque maior de possibilidades para o uso do posicionamento por satélite. O posicionamento relativo cinemático, sob determinadas condições, apresenta esta característica, havendo expectativas de que esta seja robustecida em um futuro próximo com a modernização e integração dos sistemas de posicionamento.

No método cinemático a antena pode ser montada em uma plataforma móvel, como por exemplo, barcos e aviões, ou em um bastão conduzido por uma pessoa. No monitoramento de estruturas, a antena pode ser afixada a um dado elemento estrutural de interesse e acompanhar os deslocamentos espaciais naquele ponto.

TABELA 2.12: EXEMPLOS DE PRECISÕES
NECESSÁRIAS EM POSICIONAMENTO DE
TRAJETÓRIAS

EXEMPLOS DE APLICAÇÕES	PRECISÃO NECESSÁRIA (m)
- AMOSTRAGEM DE SOLO; - DETECÇÃO DE CARREADORES; - MAPEAMENTO DE CULTURAS. - BATIMETRIA; - NAVEGAÇÃO COSTEIRA; - LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE VEÍCULOS	± 1
- ESPALHAMENTO DE FERTILIZANTES MINERAIS; - POSICIONAMENTO DE PLATAFORMAS DE EXPLORAÇÃO PETROLÍFERA; - APLICAÇÃO DE PESTICIDAS; - CULTIVO DO SOLO. - NAVEGAÇÃO AÉREA, EM APROXIMAÇÃO.	$\pm 0,1$
- PERFURAÇÃO, CRAVAÇÃO DE ESTACAS PRÉ MOLDADAS; - ARAGEM; - ESCAVAÇÃO DE VALAS; - TERRAPLENAGEM - ATRACAÇÃO DE BARCOS - NAVEGAÇÃO AÉREA, ATERRISAGEM; - MONITORAÇÃO DE ESTRUTURAS.	$\pm 0,01$
- MONITORAÇÃO DE ESTRUTURAS	cm a décimo de mm ou menos

Como em todo posicionamento preciso, depende-se aqui da observação da portadora. O cinemático, portanto, também depende da determinação das ambigüidades iniciais (N) presentes nas medidas de fase conforme abaixo representado:

$$D_p = R + cdt_u + cdt_a + cdt_s + c \left(\frac{N}{f_p} \right) + \varepsilon_R \quad 2.52$$

onde:

D_p distância observada através da fase da portadora;

R distância satélite receptor;

cdt_u erro de sincronismo do relógio do receptor;

cdt_a atraso de propagação atmosférica;

cdt_s erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS;

c velocidade da luz;

f_p frequência da portadora

N ambigüidade (número inteiro de ciclos da onda portadora) e

ε_R ruído observacional

Os detalhes em maior profundidade podem ser verificados em WELLS (1996), LEICK (1995.) e SEEGER (2003).

O número inteiro de ciclos da onda portadora, existentes entre as antenas do satélite e do receptor no momento de início das observações, permanece como incógnita, mesmo nos métodos que proporcionam as soluções pela eliminação de parâmetros, diferenciando as observações de fase entre estações e satélites. Reside na solução desta incógnita grande parte da complexidade dos métodos para a precisa determinação de coordenadas.

SEEGER (2003) destaca que existem cinco principais categorias de abordagens para se implementar soluções de ambigüidades iniciais:

1. o método geométrico (busca no domínio das coordenadas);
2. combinações de códigos e fase da portadora (busca no domínio das observações);
3. métodos de busca das ambigüidades (busca no domínio das ambigüidades) e
4. métodos combinados entre as possibilidades acima.

Os métodos mais adequados para a resolução da ambigüidade, enquanto a antena se move, são baseados nas estratégias 2 e 3.

A eficiência de todos estes métodos será maior quanto mais se aproximar das seguintes condições:

1. a disponibilidade de satélites for maior do que seis (idealmente maior que oito);
2. os receptores estiverem separados por distâncias menores que 10 Km;
3. ausência de multicaminhamento e perdas de ciclo;
4. as condições ionosféricas forem favoráveis (baixa atividade) e;
5. os receptores possuírem baixo nível de ruído na medição dos sinais

A figura 2.13 mostra a quantidade de satélites GPS e GLONASS disponíveis no Brasil, na cidade de São Paulo em junho de 2006. Devido à combinação destas duas constelações verifica-se que na maior parte do dia há disponibilidade mínima de 9 satélites e o GDOP permanece abaixo de quatro, condição que se tem observado ser bastante favorável em termos de geometria.

FIGURA 2.13: GRÁFICO DE DISPONIBILIDADE DE SATÉLITES E FATOR DOP PARA O GPS E GLONASS.

Como estratégias para a remoção das perdas de ciclo, ou seja, das interrupções momentâneas na recepção dos sinais, as quais introduzem novas incógnitas N em uma sessão de observação, podem ser empregadas:

1. número de satélites maior ou igual a quatro durante toda a sessão de observação;
2. emprego de observações de mais de uma frequência;
3. utilização de combinações de códigos com a portadora.

O emprego de equipamentos externos também pode auxiliar na recuperação de perdas de ciclo; como exemplo cita-se LACHAPELLE, SCHWARZ (1990) apud SEEGER(1993) e KEEL et al. (1989). Os equipamentos que podem ser empregados são:

1. relógios com oscilador de alta qualidade, como o rubídio ou o césio;
2. sistemas de navegação inercial;
3. altímetros barométricos.

Viabilizada a resolução de ambigüidade em movimento, isto permitiu aplicações em tempo real. Surgiu então o Real Time Kinematic (RTK), ou, cinemático em tempo real. Para este tipo de posicionamento é necessário proporcionar a transmissão de dados por telemetria do receptor base para o móvel. Emprega-se meios de transmissão de dados usando o formato RTCM SC-104 (Comite Especial 104 do Radio Technical Commission for Marine Services), versão 2.1 ou superior. As versões superiores do RTCM são mais adequadas por incluírem opções para transmissão de dados GNSS e de variação do centro de fase da antena.

A taxa de transmissão de dados mínima deve ser de 4800 bps (bites por segundo). Mas quanto mais informações por unidade de tempo maior deverá ser a taxa de transmissão, podendo ser necessário adotar velocidades de 19200 bps ou mesmo maiores devido à taxa de aquisição e quantidade de sinais observáveis. Além da velocidade de transmissão é necessário que o sistema tenha baixa latência, ou seja, curto período entre a observação pelo receptor base e o efetivo aproveitamento pelo móvel.

As frequências de transmissão mais adequadas estão na banda VHF (very high frequency) 30 – 300 MHz e UHF (ultra high frequency) acima de 400 MHz, pois estas permitem maior volume e rapidez na transmissão de dados, bem como menor custo. O uso destas frequências é controlado, sendo necessário em alguns casos obter permissão de uso ou se adequar a restrições de alcance.

Além das limitações de alcance impostas por restrições legais é necessário conviver com aquelas impostas pela topografia. A comunicação entre os receptores é dependente da linha de visada entre as antenas: transmissora e receptora de dados; a comunicação pode ser racionalizada pelo melhor posicionamento de estações base ou repetidoras. Numa primeira etapa toma importância a verificação da linha de visada entre as estações de rádio, obtendo-se a distância em quilômetros conforme propõe LANGLEY (1998):

$$d = 3.57\sqrt{k}(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad 2.53$$

onde:

d distância entre a estação transmissora e receptora;

k fator dependente da curvatura terrestre e da refatividade (1.2 a 1.6);

h_t altura da estação transmissora e

h_r altura da estação receptora

Contudo, a transmissão não é influenciada apenas pela curvatura terrestre, refração ou topografia, mas deve-se prever também a perda de potência, pois o sinal sofre atenuação em função da distância que separa as duas antenas.

Uma alternativa de comunicação pode ser a tecnologia GSM aproveitando-se um eventual declínio do custo das tarifas com o progressivo aumento do uso de suas aplicações.

A resolução da ambigüidade no método cinemático, tipicamente é feita por meio de testes de várias combinações de conjuntos de ambigüidades ou mesmo ternos de coordenadas. A busca é realizada a partir de uma estimativa *a priori*, seja das ambigüidades, seja das posições. Estes dois tipos de domínios onde podem

ocorrer as buscas são chamados de espaço matemático e espaço físico, respectivamente. A figura 2.14 apresenta um diagrama com a estratégia geral empregada para a resolução das ambigüidades no posicionamento OTF, ABIDIN (1993).

As diferenças entre as várias técnicas estão no âmbito dos critérios de aceitação e rejeição, empregados para encerrar o processo, diferindo em:

1. tipo e número de critérios;
2. formulação e aplicação de suas seqüências.

Estes métodos estão largamente descritos na literatura e têm sido implementados em programas tanto para fins comerciais quanto científicos. Em LEICK (1995), TEUNISSEN (1998), SEEBER (2003) e MÔNICO (2005) podem ser obtidas informações em maior profundidade.

3. IDENTIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS PELA ANÁLISE MODAL

Neste capítulo se discorrerá brevemente sobre conceitos a respeito de deslocamentos, sistemas dinâmicos, análise modal e transformação de coordenadas, considerados necessários aos experimentos realizados.

3.1 Ações

Conforme FUSCO (1976) a qualidade de um sistema material, tal como uma estrutura civil, é definida por um conjunto de atributos, composto por variáveis de estado, cujos valores instantâneos definem o estado do sistema material. A determinação de quais atributos se devem considerar na caracterização do estado do sistema é dada em função dos requisitos necessários à utilização satisfatória do mesmo. Em geral estas variáveis de estado podem ser divididas em externas e internas. As primeiras medem as causas e as segundas os seus efeitos e determinam os estados de utilização e desempenho, respectivamente. Entre estas variáveis internas e externas existem diversas formas de dependência funcional que retratam o comportamento do sistema estrutural.

No contexto da segurança de estruturas as variáveis externas medem a intensidade das ações e as variáveis internas medem a intensidade dos efeitos correspondentes. Entende-se por ação as causas ou conjunto de causas capazes de produzir, na estrutura, estados de tensão. O conceito de tensão será definido mais a diante.

As variáveis externas quantificam ações atuantes, tais como:

- peso próprio;
- variações de temperatura;
- cargas ativas estáticas, tais como empuxos sobre a estrutura;
- cargas ativas, estáticas ou dinâmicas, tais como as decorrentes de maquinário e equipamentos, do trânsito de veículos, do vento e;
- reações de apoio (reativas) e outras;
- recalques de apoio e
- excitação de suporte (sismos).

As variáveis internas quantificam efeitos estruturais de interesse tais como:

- esforços solicitantes;
- deslocamentos;
- tensões
- deformações e
- abertura de fissuras.

De forma genérica, em uma estrutura civil, é condição necessária para sua segurança que o nível de solicitação, representado pelas variáveis básicas de solicitação (externas ou internas) seja menor do que a capacidade resistente do sistema estrutural. Esta última entendida como a capacidade de apresentar estados satisfatórios de desempenho, representados, em princípio, por variáveis básicas de resistência dos materiais, FUSCO (1976).

As ações externas citadas, traduzidas em forças que se propagam através do material da própria estrutura, podem provocar deslocamentos espaciais, alterando o equilíbrio de forças internas. Havendo deslocamento na posição de pontos dos elementos estruturais, dependendo das características destes e das ações impostas, o mesmo poderá resultar na alteração de forma e/ou volume, ambos com caráter instantâneo ou permanente dependendo basicamente do comportamento do material.

Sendo determinadas posições suficientemente precisas e confiáveis, adquire-se a capacidade de determinar os deslocamentos entre épocas. Estes podem contribuir para as análises estruturais, na medida em que eles podem expressar o efeito de uma força realizada sobre a estrutura ou em um de seus elementos, tal como a passagem de um veículo pesado sobre uma ponte provocando um deslocamento vertical em determinado ponto de uma viga que sustenta o pavimento. Estas determinações são de interesse da monitoração geodésica, na medida em que possam representar informações confiáveis e independentes de outros métodos de monitoração e contribuir para a formação de juízos sobre a segurança da estrutura.

3.2 Comportamento reológico dos materiais

A avaliação da segurança de estruturas requer a idealização do seu comportamento baseado em modelos adequadamente simplificados de forma a permitir um tratamento analítico do problema. Neste aspecto são importantes os comportamentos básicos dos materiais explicados através da reologia.

Pode-se definir reologia como sendo o estudo da deformação e fluxo da matéria sob influência de forças, sob certas condições termodinâmicas, num dado intervalo de tempo. O dístico atribuído a Heráclito (540-475 A. C.): *παντ ρει* (*panta rhei* = tudo flui) é o lema emblemático associado à reologia, derivando dele este termo acima, empregado por Eugene Bingham na segunda década do século XX. O comportamento dos materiais é obtido a partir de estudos experimentais (reometria) envolvendo testes sobre amostras de materiais empregando seus resultados para formular leis empíricas ou fenomenológicas.

Neste trabalho distinguem-se inicialmente três comportamentos básicos: elástico, plástico e viscoso. O comportamento elástico de um material corresponde à capacidade de manter as dimensões originais, de um corpo por ele constituído, após a remoção de uma força aplicada sobre o mesmo. O comportamento elástico pode ser linear, caracterizado pela variação homogênea das componentes dos estados de tensão e deformação correspondentes e não linear quando ocorre o contrário, ou seja quando esta variação não é homogênea. O comportamento plástico do material se caracteriza pela deformação de um corpo sob a ação de uma força sem que este recupere a sua forma original após a cessação da mesma. No comportamento viscoso um material apresenta resistência interna em fluir sob tensão, devido ao atrito. Os materiais podem apresentar ainda comportamentos intermediários, sendo um deles o visco-elástico que apresenta elasticidade linear variando no tempo, tendo como exemplo o fenômeno da deformação lenta no caso do concreto.

3.3 Sistemas dinâmicos

Vibrações, ou movimentação dinâmica, ocorrem devido às forças naturais ou às atividades humanas, tais como um terremoto ou o trânsito de veículos. Forças

internas e externas, atuando de forma dinâmica sobre um sistema estrutural, provocam movimentos oscilatórios deslocando-o no espaço. O conhecimento da amplitude destes movimentos pode trazer contribuições nos processos de monitoração das estruturas civis. O emprego da tecnologia de posicionamento por satélite para monitorar estes deslocamentos requer a definição de alguns conceitos para melhor conceituação do problema.

MAIA *et al* (1997) descreve que as propriedades dinâmicas de um sistema mecânico são a massa, a rigidez e o amortecimento. Tais propriedades são responsáveis pelas forças: inercial, elástica e dissipativa, respectivamente. Descrever a interação destas propriedades ao se modelar sistemas mecânicos reais é uma questão de extrema complexidade, pois, uma “estrutura real é um sistema elástico contínuo e heterogêneo, o qual possui um infinito número de graus de liberdade”. Devido a estas características aquele autor apresenta, então, grande dificuldade de modelagem e esta sempre representará uma aproximação, mas, para a maior parte dos casos, pode-se obter “resultados satisfatórios se as propriedades básicas forem consideradas em separado em elementos discretos simples que, propriamente combinados, podem representar as propriedades dinâmicas do sistema com suficiente precisão”, MAIA *et al* (1997).

Para apresentar as definições de interesse nesta pesquisa toma-se como exemplo o caso mais simples e discreto, ou seja, a equação do movimento para modelos visco-elásticos (fig. 3.1) com um grau de liberdade:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad 3.1$$

onde:

m é a massa em kg;

$\ddot{x}$ é a aceleração em m/s^2 ;

c é o constante de amortecimento;

$\dot{x}$ é a velocidade em m/s;

k é a constante de rigidez

x é o deslocamento em m e

F é a força externa, em N (newtons) , atuante em função do tempo t em segundos.

As grandezas m , c e k , são as propriedades dinâmicas de um sistema mecânico e $m\ddot{x}$, $c\dot{x}$ e kx são, respectivamente, as forças de inércia, amortecimento e rigidez elástica.

Os problemas dinâmicos requerem tratamento por intermédio de equações diferenciais de 2ª ordem. A solução de 3.1 pode-se dar pela soma das soluções de equações lineares homogêneas com coeficientes constantes conforme demonstrado em MAIA *et al* (1997).

Quando $f(t)$ se iguala a zero, diz-se que o sistema está sob vibração livre, ou seja, vibra sem a ação de forças externas. Ocorrendo a vibração sob ação de uma força externa o sistema estará sob vibração forçada.

Geralmente maiores que a força de amortecimento $c\dot{x}$, as forças de inércia $m\ddot{x}$ e de rigidez kx agem em direções opostas. Existirá uma determinada frequência em que ambas terão a mesma magnitude, cancelando-se, quando então o movimento passa a ocorrer sob o predomínio da força de amortecimento, ARMER (2001). Tal frequência é denominada de frequência natural f_0 , medida em ciclos por segundo (Hz).

Observa-se que as forças de rigidez e de inércia devem predominar abaixo e acima do valor de f_0 , respectivamente. Entretanto, se o sistema for excitado por uma

força dinâmica com uma frequência f igual a f_0 ocorre o fenômeno da ressonância, quando então tem princípio a amplificação do movimento oscilatório x , mantendo-se constante f . O estado de ressonância deve ser evitado em uma estrutura, pois, o mesmo pode levá-la ao estado de desestruturação física e finalmente à ruína (colapso). Por esta razão são estabelecidos padrões de segurança definindo a frequência máxima em que uma estrutura poderá vibrar em operação sob ações de cargas dinâmicas, chamada de frequência crítica, por exemplo, a NBR 6118 recomenda que:

$$f_0 > 1,2 f_{crit}$$

No caso de um sistema com múltiplos graus de liberdade, figura 3.2, ter-se-á N equações diferenciais de segunda ordem. Elas não podem ser resolvidas de forma isolada, pois, são acopladas, ou seja, a resposta dos movimentos para uma das coordenadas (x) depende dos movimentos correspondentes às outras coordenadas. A justificativa para esta dependência advém do fato de que cada equação possui termos que envolvem mais de uma coordenada.

Se cada uma das massas for excitada por forças externas $F_i(t)$, ($i=1,2,3,...N$) e estabelecendo-se o equilíbrio das forças atuantes nestas massas, os movimentos do sistema com múltiplos graus de liberdade são governados pelo sistema de equações:

$$\begin{aligned}
m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 &= F_1 \\
m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + (c_1 + c_3) \dot{x}_2 - c_3 \dot{x}_3 + k_2 x_1 + (k_2 + k_3) x_2 - k_3 x_3 &= F_2 \\
m_N \ddot{x}_N - c_N \dot{x}_{N-1} + (c_N + c_{N+1}) \dot{x}_N - k_N x_{N-1} + (k_N + k_{N+1}) x_N &= F_N
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Um método conveniente de solucionar o sistema acima é o emprego do cálculo matricial, que se representa 3.2 em sua forma compacta:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \tag{3.3}$$

Onde:

$[M]$, $[C]$ e $[K]$, são matrizes simétricas $N \times N$, respectivamente de massa, amortecimento e rigidez, descritoras das propriedades espaciais do sistema.

$\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$ e $\{x\}$ são vetores $N \times 1$ das respostas em aceleração, velocidade e deslocamento, variáveis no tempo e

$\{F\}$ é o vetor $N \times 1$ das forças externas de excitação, que também são variáveis no tempo.

Um sistema complexo com N graus de liberdade e respectivas frequências naturais apresenta vários modos de vibração. Na engenharia civil até pouco tempo havia maior interesse no modo de vibração com a menor frequência, denominado de modo fundamental, entretanto atualmente, verifica-se também o interesse pelas frequências mais altas, pois através de análises destas, pode-se avaliar os efeitos de micro fissurações. ARMER (2001) esclarece que cada modo de vibração ou modo normal poderá ser descrito pela frequência natural, pela rigidez, pelo número do modo de vibração ou pela constante de amortecimento, posto que todos eles variem com a amplitude de deslocamento do sistema. Dentre eles, a f_0 é a que apresenta maior facilidade de mensuração e muitas vezes é o único objetivo de testes, e/ou, ensaios.

As propriedades dinâmicas de um sistema estrutural com N graus de liberdade, segundo MAIA *et al* (1997) podem ser descritas pelos três modelos a seguir:

Modelo Espacial: as propriedades dinâmicas do sistema são decorrentes da distribuição espacial de massa, de rigidez e de amortecimento. Estas são descritas pelas respectivas matrizes $[M]$, $[K]$ e $[C]$ de ordem N , que resultam em um problema de autovalores (frequências naturais ω) e autovetores (modos de vibração ψ) que, se solucionado, denomina-se modelo modal. Consistem em modelos numéricos tridimensionais desenvolvidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

Modelo modal: é composto pelas propriedades modais, representadas por N frequências naturais, amortecimentos modais e vetores dos modos de vibração (deformadas modais).

Modelo de resposta: é determinado pelas Funções de Resposta em Frequência (FRF) da estrutura, a partir de variáveis adquiridas experimentalmente pelas medidas das respostas, a estímulos, da estrutura, tais como: os deslocamentos, as velocidades e as acelerações. Nos modelos de resposta os graus de liberdade são limitados pelo número de pontos de medidas definidos para o ensaio.

Estes três modelos se inter-relacionam. Sob os aspectos teóricos, partindo-se do modelo espacial, constituído pelas informações de projeto procura-se obter as respostas no modelo correspondente. Em síntese significa percorrer o caminho do modelo espacial para o modelo de resposta, passando pelo modelo modal. Entretanto principiando-se por uma estrutura já construída, normalmente há maior grau de complexidade, pois persistem incertezas decorrentes, por exemplo, da interação com o solo, da qualidade da construção, do uso, de acidentes e tipo de apoio, que alteram suas características. Deste ponto de vista é necessário que se desenvolva um modelo de resposta para construir um o modelo modal. Usualmente tomam-se medidas de acelerações em um determinado número de pontos da estrutura. Estas são analisadas no domínio da frequência, obtendo-se as FRF's, representativas de um reduzido número de graus de liberdade do sistema construído. Através de técnicas de

identificação espectral cria-se então o modelo modal. As relações acima descritas são melhores representadas pela figura 1.1, aqui repetida por conveniência.

$$Y(\omega) = \frac{\text{resposta em velocidade}}{\text{força excitadora}} = \text{mobilidade}$$

$$A(\omega) = \frac{\text{resposta em aceleração}}{\text{força excitadora}} = \text{acelerância ou inertância}$$

Como o deslocamento, a velocidade e a aceleração são respostas estruturais matematicamente inter-relacionadas, tendo-se o conhecimento de uma FRF em termos qualquer um destes parâmetros de movimento pode-se possibilitar a derivação de outra forma de FRF.

Nesta pesquisa procura-se desenvolver um método para a determinação da frequência de resposta em pontos da estrutura através da determinação dos deslocamentos sofridos pelos mesmos.

Para estudos mais abrangentes destes tópicos, ou seja, sobre análise modal de estruturas recomenda-se consultar MAIA *et al* (1997) e ARMER (2001) e PENNER (2001).

3.4 Elementos a serem considerados em projetos de monitoração de deslocamentos

Pelos conceitos acima expostos depreende-se que a primeira providência a ser tomada num projeto de monitoração de deslocamentos em estruturas refere-se à necessidade de conhecer os elementos a serem medidos e as respectivas tolerâncias para determinação dos seus deslocamentos nos pontos observados. Tais elementos devem ser fornecidos pelo calculista estrutural e constituem os vetores dos deslocamentos esperados para pontos críticos da estrutura; as respectivas tolerâncias e a frequência natural de vibração. São também úteis informações sobre propriedades dos materiais e identificação de diferenças entre a estrutura real e o modelo.

Estes parâmetros serão usados pelos responsáveis pelas medidas a serem realizadas na estrutura com os objetivos básicos de:

- especificar equipamentos geodésicos com suas respectivas precisões nominais, frequências de aquisição e demais características que possam contribuir para o projeto de monitoração, tal como, operação remota ou algoritmos de redução de multicaminhamento;
- definir a metodologia a ser aplicada à monitoração para que se possa realizar observações precisas e confiáveis e
- projetar um sistema de referência adequado que atenda a metodologia proposta.

3.5 Análise dos deslocamentos

Consideradas a natureza discreta das determinações dos experimentos realizados por tecnologia de satélite e a conveniência de comparar a frequência dos deslocamentos assim determinados à frequência obtida por outros métodos dinâmicos de monitoração, torna-se conveniente para estes experimentos fazer uso da Transformada Discreta de Fourier (DFT) para análise dos resultados. Este tipo de ferramenta é normalmente empregado nos estudos de natureza dinâmica e pode ser calculado com eficiência e maior rapidez através do algoritmo desenvolvido em 1965 por Cooley e Tuckey, denominado de Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Suponha-se a disponibilidade de um conjunto finito de amostras equiespaçadas de um sinal: $g_0, g_1, g_2, \dots, g_{N-1}$ e um número finito de frequências, também regularmente espaçadas: $f_n = n/N\Delta t$ com $n=0, 1, \dots, N-1$, sendo $\Delta t=1$. A Transformada Discreta de Fourier, respectivamente direta e inversa, para estas N amostras será dada por:

$$G_n = \sum_{t=0}^{N-1} g_t e^{-i2\pi nt/N}; 0 \leq t \leq N-1$$

$$g_t = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} G_n e^{i2\pi nt/N}; 0 \leq n \leq N-1$$
3.4

No caso em estudo a DFT é empregada para verificar as frequências medidas e orientar a filtragem dos dados, empregando-se em seguida a transformada inversa para obter a amplitude dos deslocamentos.

A aplicação prática da análise de Fourier requer cuidados com relação à frequência f_a de amostragem do sinal, observando o teorema de Nyquist ou Shanon, tomando-se o cuidado para que $f_a \geq 2f_{max}$, sendo f_{max} a maior frequência de interesse do fenômeno a ser analisado. Mazilli (comunicação pessoal) adverte, entretanto, que o valor mais adequado para a análise modal de estruturas corresponde a um fator de 10 vezes f_{max} .

Uma revisão mais abrangente sobre o assunto poderá ser obtida em PERCIVAL (1993); MORETTIN (1999) e MAIA *et al* (1997).

3.5.1 Ondaletas

A análise espectral de séries temporais através da transformada de Fourier permite discriminar as frequências presentes nestas séries, porém, o faz de forma independente da localização no tempo. Outrossim, se observa que esta forma de proceder à análise espectral melhor se aplica em séries temporais ergódicas, as quais se desenvolvem no tempo aleatoriamente, mas, possuem momentos estatísticos invariantes; fato que não se verifica em geral com os dados experimentais de processos físicos, tal como a vibração de uma estrutura. Ainda, conforme observa MORETTIN (1999), sobre as Bases de Fourier “pequenas mudanças em algumas das observações podem provocar mudanças em todas as componentes de uma expansão de Fourier.”. Com emprego da análise de séries pelo método de Fourier para análise de dados não ergódicos deixa-se de ter acesso às informações sobre a distribuição de frequências e a densidade de energia em relação ao intervalo de tempo em que se desenvolve a série, visto que, estas informações variam no desenvolvimento da série não estacionária.

Uma vez mais sob considerações quanto não estacionariedade das series temporais, pode-se admitir que, mesmo uma série desta natureza, é capaz de apresentar estacionariedade por certos períodos, curtos ou longos. Observa-se também que a maioria dos procedimentos de análise estatística de séries temporais

tende a usar esta estacionariedade. Tendo os dados uma natureza estatística diversa da ergódica, coexiste a possibilidade de se realizar transformações nos dados originais e obterem-se séries estacionárias passíveis desta análise, conforme expõe em outra obra MORETIN e TOLOI (2006).

Como observa aquele autor, para séries estacionárias, sob o aspecto algorítmico predomina a análise de Fourier, mas para aquelas não estacionárias, cabe atualmente considerar muitos algoritmos, recebendo destaque na atualidade aqueles que operam com ondaletas.

O desenvolvimento da transformada de ondaletas (do francês *ondellete*: pequena onda) é fruto de um processo que remonta o começo do século XX com Alfred Haar e tem um marco notável nos trabalhos desenvolvidos por Grossmann e Morlet na década de 1980, ao quais se devem também o emprego do termo, estendendo-se até a atualidade pelo trabalho de pesquisadores como Ingrid Daubechies.

A análise de séries temporais não estacionárias com uso de ondaletas tem se demonstrado uma eficiente forma de tratamento de dados não estacionários, pois, pode proporcionar a localização em frequência e tempo (ou espaço) contrariamente ao que se obtém com a análise de Fourier.

A transformada de ondaletas utiliza funções assim denominadas por terem a característica de pequenas ondas com curto período de duração; estas funções possuem energia finita e propriedades de localização temporal, podendo ser utilizadas com eficiência para representar sinais de pequena duração no domínio do tempo, tal como uma pequena onda que vai ao ápice e decai em um curto período de tempo, vindo daí o seu nome. A eficiência desta análise se dá à medida que para a representação de um sinal complexo, é necessário somente um número finito de parâmetros. Devido a este caráter, as bases de ondaleta, são denominadas de transientes, sendo adequadas para analisar funções que também apresentam tal característica. Portanto, a função ondaleta $\psi(t)$ deve satisfazer as duas propriedades básicas de possuir integral igual a zero e que sua energia unitária, ou seja:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad 3.5$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^2(t) dt = 1 \quad 3.6$$

A primeira confere a propriedade de expressar uma onda cuja área sob seu gráfico seja igual à zero; esta característica (forma tipo onda) lhe confere a condição conhecida como admissibilidade. A segunda propriedade (3.6) proporciona um suporte compacto, conferindo o decréscimo rápido em amplitude e garantindo que se tenha a localização espacial. São propriedades importantes, pois, se a energia é concentrada em uma pequena região, a ondaleta é mais localizada e fornece melhor representação do sinal no plano tempo-frequência ou tempo-escala, ou seja, maior resolução. PINTO (2005).

A ondaleta $\psi(t)$ é chamada usualmente de ondaleta mãe e sofre dilatações $\psi(t) \rightarrow \psi(2t)$ e translações $\psi(t) \rightarrow \psi(t+1)$, gerando ondaletas filhas. A primeira é definida por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R} \text{ e } a > 0 \quad 3.7$$

Onde:

a é o fator de escala;

b é o fator de translação.

A forma da ondaleta permanece, mesmo sob a dilatação ou a compressão. Variando-se a escala a , a ondaleta mãe é ampliada ($a > 1$) ou contraída ($0 < a < 1$). Pelo fato da função ondaleta ser localizada em um intervalo finito, quando se aumenta a escala a correspondente função ondaleta fica localizada em intervalos de tempo cada vez menores, proporcionando localização temporal. A transformada de Fourier da função ondaleta determina a localização em frequência, podendo ser interpretada como um filtro passa banda.

O princípio básico da análise em ondaleta consiste em se decompor o sinal em vários níveis de resolução alterando-se a escala e transladando-se esta função ao

longo da série de dados. Este processo é conhecido como *Multiresolução* e fornece uma moldura hierárquica para interpretação do sinal, BOLZAN (2006). Sob diferentes escalas se caracterizam distintas estruturas físicas do sinal.

Considerando-se um sinal s de tal forma que $s = 2^n$ valores. Tomando-se uma série com 1024 valores, conseqüentemente $n = 10$; ter-se á, portanto, 10 escalas (frequências) a serem discriminadas na transformada em ondaletas.

A primeira escala corresponde a $2^{n-1} = 2^9$ ou 512 valores, implicando na divisão da série em duas partes iguais. A ondaleta mãe será então comprimida pela metade e aplicada na primeira das duas partes da série temporal s e por fim transladada e aplicada à segunda parte. O mesmo se sucederá com o segundo nível de 2^8 , ocorrendo à divisão da série em quatro partes iguais, devendo ocorrer aplicações, da ondaleta proporcionalmente comprimida, transladando-a para cada uma das partes sucessivamente, para proporcionar diferentes níveis de resolução. O processo se repetirá até 2^1 e viabilizará um diagrama conhecido como periodograma de ondaleta.

A análise de ondaletas de uma série temporal $f(x)$ é baseada na convolução deste sinal com sucessivas funções representativas da função ondaleta mãe em escalas sucessivas e transladadas no tempo.

A transformada em ondaleta continua é uma transformada linear que pode ser aplicada a sinais não ergódicos possibilitando a localização temporal das várias frequências inerentes aos mesmos.

Pode-se representar a convolução de $f(x)$ com o complexo conjugado ψ_0^* da ondaleta mãe $\psi_{a,b}(x)$ na forma da equação 3.8:

$$W_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_0^* \left(\frac{x-b}{a} \right) dx, \quad 3.8$$

Deve-se observar que:

$$\psi_b(x) = \psi(x-b) \quad 3.9$$

$$\psi_a(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{x}{a} \right), a \neq 0 \quad 3.10$$

são funções derivadas da ondaleta mãe e representam respectivamente a translação e

o escalonamento, notando ainda que $\frac{1}{\sqrt{a}}$ é o fator de normalização da energia para cada ondaleta $W_{(a,b)}(x)$ de forma a manter a mesma energia da ondaleta principal. A energia da transformada em ondaleta é definida por $|W_{a,b}(x)|^2$.

O valor $W_{(a,b)}(x)$ representa a similaridade entre a função ondaleta $\psi_0[(x-b)/a]$ e a função analisada $f(x)$, ou seja, quanto maior o valor de $W_{(a,b)}(x)$ maior a similaridade da função analisada com a ondaleta mãe utilizada BARBOSA (2007).

O conjunto dos valores de $W_{(a,b)}(x)$ proporciona uma representação em duas dimensões do sinal analisado no tempo ou no espaço e por escalas, frequências ou ainda, números de ondas.

A escolha da melhor ondaleta para um dado problema não é uma tarefa simples, mas basicamente deve-se procurar por aquela que possa melhor realçar as características do sinal estudado, OLINTO (2005). Nesta pesquisa, após testes com os dados, utilizando-se a função *wavemenu* do MATLAB versão 7.0, considerou-se a ondaleta de *Morlet* mais eficiente na identificação das frequências dos sinais empregados.

Define-se a ondaleta de Morlet pela seguinte expressão:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i w_0 \eta} e^{-1/2 \eta^2} \quad 3.11$$

Onde:

w_0 é uma frequência adimensional

η é um tempo adimensional ($\eta = 1, \dots, N$). Onde N é o número de valores da série analisada.

Devido à transformada em ondaleta não ser perfeitamente localizada no tempo, resulta desta característica efeitos de borda, devendo-se usar o cone de influência, para que estes efeitos possam ser desprezados.

Torna-se conveniente realizar testes de significância, procedimento que tem sido pouco usado na maioria das aplicações em ondaletas. A significância estatística dos resultados pode ser obtida com emprego da ‘hipótese nula’ em que o sinal é ruído vermelho com dado ‘Espectro de Energia de Fundo (P_k)’. Em ALLEN e

SMITH (1998) apud BARBOSA (2007) pode-se verificar maiores detalhes, donde se extrai:

$$P_k = \frac{1-\alpha^2}{|1-\alpha e^{-2i\pi k}|^2} \quad 3.12$$

Onde:

k é a ordem da banda de frequência de Fourier e

α é um coeficiente de auto correlação da série com ruído vermelho.

Considera-se que o nível de confiança de 95% no espectro de energia da ondaleta é obtido quando este é aproximadamente 3 vezes maior que P_k do ruído vermelho.

3.5.2 Filtros

Os filtros correspondem a mecanismos que deixam passar componentes de um sinal com frequências em uma determinada faixa do espectro. Supondo-se uma série $X(t)$ denominada série de entrada; $Y(t)$ denominada série de saída, ou série filtrada, e a função Γ , filtro do sistema, se pode estabelecer que:

$$Y(t) = \Gamma(X(t)) \quad 3.13$$

Os filtros digitais podem ser empregados, portanto, para separar bandas de interesse nos sinais. Existem diversos tipos de filtros disponíveis, dentre os experimentados foi escolhido o filtro passa alta e passa banda *Equiripple Frequency Impulse Response Filter* e o passa banda *Constrained Least Squares Frequency Impulse Response Filter* presente na ferramenta Sptool do Matlab, com a qual se ajustou um filtro específico para cada caso analisado, conforme os exemplos nas figuras 3.4 e 3.5.

FIGURA 3.4: FILTRO PASSA ALTA, EMPREGADO PARA SEPARAR VALORES ACIMA DE 0,862 HZ.

FIG. 3.5: SINAL FILTRADO.

Uma revisão mais abrangente sobre filtro poderá ser obtida em PERCIVAL (1993); MORETTIN (1999) e MORETTIN (2006).

3.6 Matrizes de rotação

Os equipamentos de medição que produzem resultados vinculados a um sistema de referência fornecerão posições que na maioria das vezes não coincidirão

com as direções principais dos elementos da estrutura. Para que se possa conhecer as componentes dos deslocamentos determinados segundo as direções desejadas, a menos da translação, empregam-se as matrizes de rotação, as quais permitem a passagem de um sistema cartesiano destrógiro a outro, através do conhecimento dos ângulos de rotação em cada eixo. Estes ângulos serão positivos com o observador na origem do sistema, conforme a figura 3.6.

Considerado o ponto P expresso na forma vetorial por:

$$X_P = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad 3.14$$

Após as rotações α , β e γ , a posição de $P_U(u, v, w)$, no segundo sistema, se dará pela aplicação das matrizes de rotação $R_1(\alpha)$, $R_2(\beta)$ e $R_3(\gamma)$ aos correspondentes eixos. Portanto considerando-se as matrizes de rotação, se terá:

$$\begin{aligned}
R_1(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\
R_2(\beta) &= \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \\
R_3(\gamma) &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Pode-se expressar a nova posição de P por:

$$X_{P_U} = R_1(\alpha)R_2(\beta)R_3(\gamma)X_P \tag{3.16}$$

Conforme SEEGER (2003), efetuando-se o produto das matrizes pode-se expressar a rotação generalizada para os três eixos pela seguinte matriz:

$$R_0 = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

Assim, P_U será obtida por:

$$X_{P_u} = R_0 X_P \tag{3.18}$$

Sendo a operação inversa, ou seja, a obtenção de P em função de P_U :

$$X_P = R_0^T X_{P_u} \tag{3.19}$$

LEICK (1995) mostra que para um vetor em cujos extremos estão os pontos P_1 e P_2 , a partir das matrizes de rotação R_2 e R_3 [3.16], aplicadas às diferenças de coordenadas no sistema cartesiano geocêntrico, se terá as correspondentes coordenadas locais, com origem em P_1 , da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} n \\ -e \\ h \end{bmatrix} = R_2(\varphi - 90^\circ) R_3(\lambda - 180^\circ) \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad 3.21$$

onde:

φ latitude geodésica de P_1 ;

λ longitude geodésica de P_1 e

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} \quad 3.22$$

Para se evitar valores negativos é mais conveniente alterar o sinal de e , bem como, para simplificação, combina-se as matrizes de rotação em uma só obtendo-se a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} n \\ e \\ h \end{bmatrix} = R(\varphi, \lambda) \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad 3.23$$

Onde:

$$R = \begin{bmatrix} -\sin\varphi \cos\lambda & -\sin\varphi \sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi \cos\lambda & \cos\varphi \sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix} \quad 3.24$$

Deste sistema de coordenadas pode-se realizar a transformação para um sistema de coordenadas particular de um elemento estrutural, através do conhecimento das coordenadas comuns a dois pontos distintos.

Abaixo na tabela 3.1, a título de exemplo, são dispostas as coordenadas geodésicas de dois pontos, as componentes do vetor entre os mesmos, em coordenadas cartesianas geocêntricas e as coordenadas locais (n, e, u) extraídos da solução do vetor pelo programa Pinnacle 1.0.

TABELA. 3.1: EXEMPLO DE COORDENAS DE DOIS PONTOS TRANSFORMADAS PARA VÁRIOS SISTEMAS DE COORDENADAS (DATUM WGS 84).

STZ1		FAG1	
cartesianas			
ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	distância (m)
-916,463	-715,210	-240,244	1187,0749
geodésicas			
φ	- 21° 53' 9,756''	φ	- 21° 53' 18,238''
λ	- 46° 59' 47,229''	λ	- 47° 00' 27,565''
H	715,525 m	h	710,516 m
sistema geodésico de coordenadas locais			
n (m)	e (m)	u (m)	distância (m)
-260,9608	-1158,0241	-5,1197	1187,0748

4 METODOLOGIA DE REDES DE MONITORAÇÃO

4.1 Introdução

Na monitoração de estruturas com carga dinâmica podem ser empregados normalmente extensômetros, acelerômetros, transdutores de deslocamento, entre outros tipos de instrumentos, os quais são posicionados nos elementos estruturais, porém, não fazem uso de um referencial único na concepção que será aqui abordada. Normalmente, os equipamentos são referidos aos próprios elementos estruturais ou a um sistema de eixos vinculados à estrutura, mas sem considerar pontos referenciais independentes da mesma. Apesar disso apresentam indiscutíveis vantagens, tais como maior rapidez, menor dispêndio de trabalho e maior precisão nas mensurações.

Apesar de indiscutíveis vantagens, em comparação aos métodos geodésicos, SHAN-LONG (1991) citando SHRZANOWSKI (1986), destaca os seguintes aspectos que ainda deixam a desejar nos métodos não geodésicos:

- a) as mensurações são muito localizadas e podem ser afetadas por perturbações locais que não representam as deformações atuais;
- b) sendo as observáveis locais e não conectadas geometricamente a observáveis em outros pontos de monitoração, a análise da tendência global das deformações é mais difícil, a menos que os pontos observados sejam densamente espaçados.

Por outro lado o monitoramento geométrico por processos geodésicos, tanto com características estáticas quanto dinâmicas, pode proporcionar um sistema de referência externo e independente que conecta geometricamente todos os pontos de interesse, abrangendo áreas extensas da estrutura e proporcionando uma avaliação geométrica global da mesma. Em relação a estes pontos estáveis podem ser determinadas informações sobre a estrutura, tais como: deslocamentos relativos; rotações; translações; recalques ou posições relativas entre elementos. Para isso são empregados métodos fundamentados em tecnologias de posicionamento diversificadas e independentes, complementando-se com a fotogrametria, modelagem de superfícies por varredores (scanners) a laser, observações de ângulo, distância e desnível, bem como por geodésia espacial. Algumas destas tecnologias

podem proporcionar meios automatizados ou semi-automatizados de coleta de dados tais como estações totais robôs com reconhecimento de alvos ou com câmara CCD (charge-coupled device) e sistemas GPS em operação contínua.

A figura 4.1 apresenta um fluxograma geral das atividades desenvolvidas em um projeto de monitoração geométrica. As fases enumeradas podem ser aplicadas aos projetos com características estáticas ou dinâmicas, empregando-se praticamente qualquer das tecnologias geodésicas.

A metodologia geodésica tem por princípio contribuir para a produção de informações sobre o desempenho de estruturas a partir do posicionamento preciso de pontos específicos de elementos estruturais, de tal forma que eles possam ter suas posições conhecidas no espaço e no tempo. Se as determinações forem suficientemente precisas podem ser conhecidos os deslocamentos e outras grandezas que contribuam para se construir juízos do comportamento da estrutura e consequentemente de sua segurança, obtidos de forma independente dos outros métodos citados no primeiro parágrafo. O método geodésico pode contribuir desta

forma para a obtenção de maior confiabilidade das análises e informações complementares aos demais métodos.

Observando-se as características acima, se considera que o objetivo da monitoração geodésica será atingido com plena eficiência se houver uma rede de referência. Esta deve seguir alguns preceitos básicos, tais como: ter coordenadas com adequadas acurácia e precisão, ter longa vida útil, ou seja, perdurar enquanto existir a necessidade da estrutura ser monitorada; ser estável e independente da mesma estrutura. Com o emprego da referida rede, todos os deslocamentos determinados podem permanecer correlacionados a um único sistema, permitindo acompanhar a evolução espacial e temporal de um ponto estrutural ou entre pontos distintos na estrutura como no seu entorno.

Resta lembrar que os métodos geodésicos aplicam-se melhor aos pontos externos da estrutura; para os internos, tais como em fundações de barragens, por exemplo, restam somente os métodos não geodésicos, ou ainda alguns métodos geodésicos, tais como nivelamento, por exemplo, porém sem o referencial externo conforme aqui descrito.

Este referencial é realizado através do estabelecimento de uma rede de pontos, materializada mediante a construção de marcos com características específicas. Esta rede de referência e seus elementos são tratados no presente estudo como uma infra-estrutura necessária à monitoração por métodos geodésicos, porém considera-se que desenvolver aqui a teoria de redes geodésicas, em toda a profundidade de conceitos, não é pertinente, sendo estes, matéria sedimentada por estudos anteriores. Contudo, são abordados seus aspectos mais afetos à questão da monitoração de estruturas. Como bibliografia indicada para projeto e realização de redes por geodésia espacial recomenda-se, por exemplo: LEICK (1995), FGCC (1989) e US ARMY CORPS OF ENGINEERS (2002), SHAN-LONG (1991) e VASCONCELLOS (2003).

Observa-se ainda que, à exceção das grandes barragens, não é usual em nosso país o emprego de redes de referência desta natureza. Observa-se que os métodos geodésicos ou topográficos normalmente empregados para se monitorar estruturas,

tais como: pontes e viadutos, carecem de melhor adequação, pois normalmente as redes de referência, quando existentes, são constituídas por estações para aparelhagem topográfica simples, inadequadas para suportar as necessidades destas estruturas em termos de estabilidade, precisão e longevidade.

4.2 Aspectos gerais de projetos para monitoração de deslocamentos em estruturas

Quando todos os detalhes que envolvem um projeto de monitoração geométrica de estrutura são analisados de forma sistêmica, verifica-se que o simples emprego de um instrumento que possa viabilizar medidas de alta precisão e de uma rede de pontos de referência não é, por si, suficiente para se obter medidas precisas e acuradas. Portanto, para bem conduzir o projeto, deve-se principiar por um levantamento de informações e cuidadoso planejamento, considerando, entre outros que possam ser necessários, os seguintes aspectos:

- a) pontos a serem observados na estrutura e tendências de deslocamentos;
- b) tolerâncias dos erros das observações com que devem ser realizadas as medições;
- c) escala de tempo do fenômeno que deve ser medido;
- d) tecnologias possíveis a empregar e a correspondente metodologia de medição, adequadas ao tipo de estrutura, às circunstâncias e ao meio ambiente;
- e) viabilidade de se obter observações com a precisão e a acurácia desejadas;
- f) logística necessária ao desenvolvimento das diversas campanhas de medições e
- g) possibilidade de minimizar os custos do projeto a ser empreendido.

O período em que ocorrem os deslocamentos, considerado para uma dada estrutura, é fundamental na definição da metodologia a ser empregada. Por exemplo, no controle de deslocamentos de uma barragem, as medições são realizadas com intervalos de semanas a meses, enquanto que em uma ponte o intervalo pode ser de

minutos quando a carga é estática e de alguns segundos, com alta taxa de aquisição de dados, quando a carga é dinâmica. Sob outras considerações pode ser necessário o monitoramento contínuo, tanto em baixas quanto em altas taxas de aquisição de dados, bem como pode ser desejável um determinado nível de automatização do processo.

Aspectos ambientais e sociais também têm impacto nos projetos de monitoração, pois podem acrescentar sérias dificuldades sob o ponto de vista de segurança para a equipe, os equipamentos e a infra-estrutura da rede de monitoração, bem como nas próprias observações. Portanto, pode haver necessidade de prever proteções contra insolação, ventos fortes, chuva, roubo e vandalismos, por exemplo.

Vários são os fatores que podem afetar a qualidade das observações no posicionamento de alta precisão. Esta condição não é exclusiva dos sistemas de posicionamento por satélite, mas sim comum às diversas tecnologias de medição, principalmente aquelas que se desenvolvem no meio ambiente, onde as condições são pouco controláveis. Alguns destes fatores tendem a ter seus efeitos acentuados à medida que se aumenta a distância entre os instrumentos de medição e os pontos a serem medidos; outros influem à medida da proximidade dos instrumentos a objetos ou fontes de interferência; são exemplos: os erros provocados por refração atmosférica nas medidas de distância e pelo multicaminhamento e bloqueio nos sinais dos satélites. O ambiente proporcionado por uma estrutura, tal como uma ponte ou viaduto, é um meio propício a apresentar ou potencializar efeitos como os citados.

A influência do meio ambiente, da topografia e da geologia no entorno de estruturas também deve ser avaliada com cuidado, de forma que possam ser compreendidos seus efeitos sobre cada uma das tecnologias a empregar.

Compete, então, elaborar um planejamento detalhado de monitoração; de forma geral é necessário considerar os seguintes itens:

- a) o conhecimento geral da estrutura e seus princípios básicos;
- b) a quantidade e a localização de pontos a monitorar na estrutura;

- c) a precisão das coordenadas tridimensionais dos pontos a monitorar;
- d) a nomenclatura distinta dos pontos;
- e) o conhecimento sócio-ambiental do entorno;
- f) as fases e intervalos entre as campanhas de medição;
- g) a frequência de gravação de dados;
- h) os instrumentos de medição a empregar;
- i) a calibração dos instrumentos;
- j) a metodologia de medição;
- k) a rede geodésica de referência;
- l) a geometria adequada entre observador e satélites;
- m) as fontes de multicaminhamento;
- n) as fontes de interferência em rádio frequência;
- o) o solo com resistência suficiente para implantação das referências e
- p) a logística necessária às observações.

Estes aspectos direta ou indiretamente refletem-se na rede, pois, esta é que proporcionará a integração espacial de todas as informações.

4.2.1 Precisão das determinações

A tolerância dos desvios nas coordenadas dos pontos monitorados está diretamente associada à máxima magnitude esperada no deslocamento destes pontos nas condições de operação em que a estrutura será monitorada; quanto maior a precisão das determinações maior a segurança ao se obter os deslocamentos e tomá-los como parâmetros geométricos na análise da estrutura. O manual de engenharia de levantamentos para deformação estrutural do United State Army Corps of Engineers - USACE (2002) – apresenta como avaliar a estimativa do desvio padrão das determinações, dado um deslocamento máximo esperado entre duas épocas de monitoração.

Recomenda-se que a precisão das observações deva ser igual a um terço do deslocamento máximo esperado entre duas determinações de épocas distintas

assegurando-se assim, como um fator mínimo de segurança, que a incerteza total nas coordenadas seja menor que dois terços do deslocamento total previsto. Portanto:

$$e_p \angle (1/3) \cdot D_{\max} \quad 4.1$$

onde:

e_p desvio permitido em posição;

$D_{\max}$ deslocamento máximo esperado entre duas épocas de monitoração.

Os deslocamentos são calculados pela diferença de coordenadas determinadas entre duas sessões de monitoração. Assim, os desvios padrão das duas determinações se somam para compor o desvio padrão do deslocamento entre as épocas.

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad 4.2$$

onde:

σ_d - incerteza do deslocamento entre as épocas 1 e 2;

σ_1 - incerteza na posição na época 1 e

σ_2 - incerteza na posição na época 2.

Considerando-se que as determinações das duas épocas sejam realizadas sob as mesmas condições (métodos e instrumentos), pode-se aceitar que as precisões em posição se aproximem em valor, então atribuindo o símbolo σ_0 à esta simplificação pode-se admitir a relação:

$$\sigma_0^2 \cong \sigma_1^2 \cong \sigma_2^2 \quad 4.3$$

Com base neste pressuposto, pode-se propor que uma estimativa de σ_d seja obtida através da seguinte relação:

$$\sigma_d = \sigma_0 \cdot \sqrt{2} \quad 4.4$$

Portanto, o desvio permitido em posição e_p deve ser dividido também por um fator igual à raiz quadrada de dois:

$$e_p = \frac{\sigma_d}{\sqrt{2}} \quad 4.5$$

O raciocínio acima exposto assume que a incerteza em posição deve ser dada com 95% de nível de confiança, então:

$$e_{p_{95\%}} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{2}} \quad 4.6$$

correspondendo aproximadamente a $e_{p_{95\%}} = 0,25D_{\max}$. Desejando-se expressar e_p em termos de desvio padrão (1σ), deve-se dividi-lo pelo fator de expansão para variáveis unidimensionais:

$$e_{p_{68\%}} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{2} \cdot 1,96} \quad 4.7$$

ou aproximadamente $e_{p_{68\%}} = 0,12D_{\max}$.

Tomando como exemplo a necessidade de se detectar um deslocamento estimado da ordem de 5 mm entre dois monitoramentos independentes, conduzidos pelo mesmo método, o deslocamento deve ser determinado com a seguinte precisão:

$$e_{p_{95\%}} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{2}} = \frac{5/3}{1,41} \cong 0,25 \cdot 5 = 1,25mm$$

$$e_{p_{68\%}} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{2} \cdot 1,96} = \frac{5/3}{2,77} \cong 0,12 \cdot 5 = 0,60mm$$

4.3 Implantação de redes de referência para monitoração

O objetivo da monitoração geodésica de estruturas é a determinação de posições precisas de alvos – instalados, em última instância, nos pontos significativos para a análise do comportamento estrutural - feita a partir de pontos externos de referência. As posições destes devem ser consideradas constantes no espaço e no tempo (fixas) ou apresentar deslocamento conhecido. Assim, trata-se a seguir de alguns dos aspectos correlatos. Embora se devessem abordar aspectos exclusivamente relativos ao posicionamento por satélite será feito sob um enfoque geral, particularizando para GNSS quando conveniente a esta pesquisa. Isso porque as tecnologias de posicionamento podem se complementar sob certas condições.

As redes geodésicas para fins de monitoração, conforme classificação de CHRZANOWSKI (1981) apud SHAN-LONG (1991) podem ser de dois tipos:

- a) Redes de referência, empregadas para monitoração de um objeto, para o qual os pontos de referência estão ou assume-se estarem localizados externamente a este objeto ou sua zona de influência, tal como, por exemplo, na monitoração de uma estrutura civil.
- b) Rede de monitoração relativa, onde os pontos de referência estão localizados no corpo onde há deslocamentos, por exemplo, na monitoração de placas tectônicas ou regiões sujeitas a subsidência do solo.

No tocante a esta pesquisa considera-se que está caracterizado o primeiro caso e apresenta-se a figura 4.2 que demonstra a hierarquia entre as sub-redes envolvidas.

O primeiro bloco representa um ou mais pontos, vértices de um sistema geodésico, que através deles está materializado na região de interesse. Tais vértices têm dupla função: a primeira é proporcionar coordenadas geodésicas de referência para se posicionar as demais redes e a segunda é proporcionar um controle externo para os demais vértices na rede de referência, possibilitando verificar eventuais deslocamentos nesta.

Os vértices no entorno da estrutura representam a realização de uma rede geodésica de referência. Ela serve para monitoração de estruturas civis, tais como: pontes; edifícios; barragens; entre outras. Abrange uma pequena região no entorno das mesmas, muitas vezes indo até pouco além do limite de influência da estrutura monitorada. Em geral, portanto, as distâncias envolvidas podem estar dentro de uma extensão de até 10 km, sendo caracterizadas como distâncias curtas, conforme a literatura corrente.

Enfoque diferente deve ser dado aos casos em que a monitoração abrange regiões mais amplas, tais como deformações da crosta, devido ao caráter regional que se impõem. Nestes casos existe a necessidade de construir redes mais amplas, quando então, é necessário maior espaçamento entre os vértices, mantendo-se alta precisão nas determinações. Como o seu objetivo é monitorar os deslocamentos

produzidos por forças atuantes em áreas mais extensas da superfície terrestre se faz necessário que os vértices de controle tenham suas coordenadas referidas diretamente a um Sistema de Referência Terrestre. Também é necessária a devida atenção com outras influências sobre as determinações, tais como, por exemplo: maior precisão das coordenadas dos satélites e a influência dos efeitos de forças de maré.

4.3.1 A tecnologia GPS aplicada a redes de monitoração

A tecnologia GPS, no método relativo estático, é capaz de produzir posições de pontos com alta precisão conforme pode-se verificar no capítulo 2. Todas as observações realizadas simultaneamente pelos receptores, num determinado período de tempo, no decorrer de um projeto de posicionamento por satélite, são denominadas sessões. Em distâncias curtas pode-se obter adequados resultados com sessões de observação variando entre 30 e 180 minutos. Ao aumentar a distância aumentam-se os efeitos de erros associados e anulam-se simplificações nos modelos de cálculo, requerendo métodos mais complexos de observação e processamento, neste caso são necessárias de sessões de observação mais prolongadas, que podem atingir diversas horas ou mesmo mais de um dia.

Neste estudo, para o processamento de dados da rede de referência, preferiu-se fazer uso de programas normalmente fornecidos no mercado, conhecidos na literatura como *comerciais* para diferenciá-los daqueles com finalidade voltada à pesquisa científica e com maiores recursos. A escolha baseou-se principalmente no fato das distâncias envolvidas serem pequenas, não requerendo por isso, grande refinamento no processamento dos dados observados. Os programas comerciais processam os dados no modo de simples linha de base (*single baseline*), em soluções isoladas par a par de estações, obtendo por resultado um vetor expresso, usualmente, em diferenças de coordenadas cartesianas geocêntricas no sistema WGS-84 e uma matriz de covariância do mesmo vetor. Estes programas não operam no modo de bases múltiplas (*multibaseline*) de uma mesma sessão, com os dados de todos os receptores processados simultaneamente; esta condição representa uma desvantagem, principalmente em grandes linhas de base. Este aspecto da solução por simples linha de base faz com que sejam desprezadas as correlações realmente existentes, que de

outra forma poderiam ser obtidas para os vetores resultantes de bases múltiplas observadas em uma ou mais sessões. Por conseguinte, deixa-se de explorar tais correlações apropriadamente em prol da obtenção de melhores resultados. Maiores detalhes podem ser verificados em LEICK (1995), SEEGER (2003) e MONICO (2005).

A realização de redes de referência com alta precisão requer que as observações sejam feitas no método relativo estático por ser este o método de observação mais eficiente em tais aplicações. Neste método, considera-se um conjunto minimamente constituído por duas ou mais unidades receptoras que permaneçam estáticas, durante um período previamente definido, com suas antenas adequadamente centradas, segundo a vertical que passa pelo ponto nos seus respectivos marcos. Agrega-se ainda a condição de que, pelo menos um destes pontos, possua suas coordenadas geodésicas conhecidas com adequada precisão no momento do processamento, devendo ser este o ponto inicial. As observações comuns a cada par de receptores em observação simultânea são processadas como uma linha de base simples, através de métodos de ajustamento; segue-se este procedimento para cada par de pontos, em uma sequência predefinida a partir do ponto inicial. Ao final de cada solução de simples linha de base se produzirá para cada par de estações (A, B), um vetor:

$$\vec{L}_i = \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{pmatrix} \quad 4.8$$

onde:

L_i é a *i*ésima linha de base

ΔX_i , ΔY_i e ΔZ_i são as diferenças de coordenadas cartesianas e

X_A , Y_A , Z_A , X_B , Y_B , Z_B são as coordenadas cartesianas geocêntricas das estações A e B. Associa-se também para cada par de pontos uma matriz de covariâncias das diferenças de coordenadas:

$$Q_{L_i} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad 4.9$$

4.3.2 Confiabilidade e redundância

O critério de confiabilidade remete a um bom condicionamento geométrico de uma rede, seja ela realizada por tecnologia clássica ou espacial. O projeto geométrico da rede deve proporcionar condições para que a propagação de erros possa ocorrer de forma homogênea, ou seja, sem grande desigualdade significativa na magnitude dos desvios ou predominância deste em determinada direção, por exemplo. A redundância está associada à capacidade de se determinar a coordenada de um ponto ou realizar verificações por diferentes caminhos dentro da rede, através de observações e interconexões redundantes entre vértices e permitir técnicas para se minimizar efeitos sistemáticos, com adequada relação custo/benefício. Concorre para estes objetivos a observância dos seguintes aspectos:

- observações independentes;
- redundância das observações;
- verificações externas sobre a validade dos resultados;
- calibração instrumental;
- análise da estabilidade da rede em campanhas subsequentes de monitoração;
- desejável localização de vértices de controle ou apoio por quadrantes da área ocupada pela rede, abrangendo pelo menos três;
- localização dos vértices da rede de referência por quadrantes da área em torno da estrutura, abrangendo pelo menos três;
- processamento rigoroso dos dados;
- conectividade múltipla entre estações.

No posicionamento por satélite, em qualquer dos métodos de observação e modos de processamento, seja por simples linha de base ou por linhas múltiplas é necessário cuidar para que os vetores utilizados sejam todos independentes, conforme mostrado na figura 4.3 (azuis e verdes). Para melhor depreender este

conceito considere-se um conjunto com R receptores em observação simultânea, formando uma sessão. Se R for igual a 2 existirá somente um vetor possível a se formar e o mesmo será independente. Porém, se houver três ou mais receptores numa sessão, do número total de vetores possíveis expresso por:

$$R(R-1)/2 \quad 4.10$$

serão independentes somente:

$$(R-1). \quad 4.11$$

vetores; os demais serão chamados de vetores triviais.

Os vetores independentes, em uma mesma sessão de observação, não podem constituir um polígono com geometria fechada. No caso exemplificado pela figura 4.3 se demonstra que, mesmo usando quatro receptores, são necessárias duas sessões de observação para construir a rede, representados pelos traços: verde e azul. Portanto, é preciso decidir previamente no projeto quais os vetores que devem ser formados e estabelecer o período comum de observação.

Para que se possa realizar o ajustamento da rede pelo método dos mínimos quadrados é necessário que se disponha de no mínimo dois vetores independentes em cada vértice. O leitor deve observar que o procedimento usado para definir os vetores independentes no caso dos quatro receptores também contribui para com outros critérios: o de redundância e o de confiabilidade. Na figura 4.4, à direita, o primeiro critério está representado pela presença de mais observações do que o minimamente necessário para aplicar o ajustamento (mais de dois vetores para cada ponto) e o segundo proporciona interligação entre vários pontos da rede também por diagonais, observando-se ainda que a forma geométrica da rede aproxima-se de um quadrado.

A calibração dos equipamentos deve ser prevista para antes das observações, assegurando-se a qualidade do instrumental empregado e evitando a introdução, nos dados, de erros sistemáticos. No Brasil pode-se contar com a calibração de medidores eletrônicos de distância e classificação de teodolitos, porém a calibração de equipamentos rastreadores de sinais GPS ainda não está disponível. Da mesma forma é importante a verificação e aferição de instrumental auxiliar, tal como, por exemplo, as bases nivelantes, psicrômetros e barômetros. Detalhes mínimos, como o

perfeito acoplamento de um prisma no seu suporte ou a desconsideração de correções para o centro de fase das antenas GPS, podem fazer uma substancial diferença nas observações.

A estabilidade das redes de apoio e de referência é fundamental para a determinação precisa das coordenadas dos pontos a monitorar. Por esta razão é necessário proporcionar meios de se avaliar sistematicamente se há variação nas coordenadas devido a quaisquer fatores, tais como: recalques ou insolação, por exemplo.

Após o cálculo individual de cada vetor, estes formarão uma rede com redundância de vetores, que deverá passar por um processo de ajustamento vetorial. Conforme enfatiza SEEBER (2003), este processo só é rigoroso se for também transportada para o ajustamento a matriz de variância-covariância e se explorar a informação estocástica nela contida.

Chama-se a atenção novamente, para o fato de que estas condições devem ser avaliadas no projeto da rede de forma que as soluções possam ser levadas a termo com o menor custo possível. Para simular e aperfeiçoar uma rede e os trabalhos de campo, o uso de programas contribui para a racionalização de projetos mais complexos, mas, sobretudo, a experiência é um aspecto chave na questão.

4.3.3 Rede Geodésica de Pontos de Controle

O posicionamento geodésico pelo método relativo requer o emprego de estação base sobre pontos com coordenadas conhecidas (ponto fixo) dentro de padrões geodésicos específicos, embora este procedimento não seja estritamente obrigatório para se realizar os cálculos dos vetores, pois, erros de até 100 m na posição absoluta da estação base podem satisfazer, até certo ponto, os modelos matemáticos empregados no processamento do vetor. Entretanto, a coordenada com adequada precisão é necessária para não introduzir efeitos sistemáticos na posição absoluta dos pontos a serem determinados mantendo um vínculo preciso com um sistema único. Observa-se ainda que quanto maior o desvio na posição do ponto fixo menos precisa será a solução, chegando-se ao ponto de não conseguir a resolução dos parâmetros da ambigüidade, por exemplo.

A precisão absoluta das coordenadas do vértice de controle que dará origem à rede de monitoração deve ser compatível com a precisão das coordenadas que serão determinadas na monitoração. Segundo as normas do FGCC (1989) as precisões da posição do ponto de controle para as diferentes ordens de classificação do posicionamento não devem ser maiores do que aquelas dispostas na tabela 4.2. Para melhor entendimento das classes de precisão vide primeiramente a tabela 4.1 a seguir.

TABELA 4.1 - PADRÕES GEOMÉTRICOS DE POSICIONAMENTO RELATIVO

Fonte: adaptada de FGCC (1989).

CATEGORIAS DE LEVANTAMENTOS	ORDEM	PADRÃO DE PRECISÃO GEOMÉTRICA MÍNIMA (95% DE NÍVEL DE CONFIANÇA)		
		ERRO BASE	ERRO DEPENDENTE DO COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE	
		<i>e</i> (cm)	<i>p</i> (ppm)	<i>a</i> (1 : <i>a</i>)
GEODINÂMICA GLOBAL E REGIONAL; MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS	AA	0,3	0,01	1 : 100.000.000
SISTEMA GEODÉSICO, REDES PRIMÁRIAS; GEODINÂMICA REGIONAL E LOCAL; MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS	A	0,5	0,1	1 : 10.000.000
SISTEMA GEODÉSICO, REDE SECUNDÁRIA; CONEXÕES A REDE PRIMÁRIA; GEODINÂMICA LOCAL; MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS; LEVANTAMENTOS DE ALTA PRECISÃO PARA ENGENHARIA	B	0,8	1	1 : 1.000.000
SISTEMA GEODÉSICO, LEVANTAMENTOS POR GEODESIA TERRESTRE; APOIO PARA MAPEAMENTO, REGISTRO PÚBLICO IMOBILIÁRIO, INFORMAÇÕES SOBRE USO DA TERRA; NECESSIDADES DIVERSAS NO ÂMBITO DA ENGENHARIA	C 1	1,0	10	1 : 100.000
	C 2I	2,0	20	1 : 50.000
	C 2II	3,0	50	1 : 20.000
	C 3	5,0	100	1 : 10.000

ppm: parte por milhão.

e: erro base, inclui os erros de: estacionamento da antena, erro de centro de fase e multicaminhamento.

TABELA 4.2: PRECISÕES ABSOLUTAS PARA O PONTO FIXO

Fonte: adaptada de FGCC (1989).

ORDEM	PRECISÃO MÍNIMA PARA O PONTO FIXO (m)
AA	$\pm 0,5$
A	$\pm 0,5$
B	$\pm 2,5$
1 E INFERIOR	± 25

O ponto materializado no terreno deve pertencer ao conjunto de vértices geodésicos de alta precisão do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), possuindo horizonte livre de obstruções acima de 20° , construído em forma de pilar, ser estável e provido com sistema de centragem forçada; quando possível devem ser empregados pontos da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC).

Os pontos de controle devem ser verificados quanto à ocorrência de prováveis deslocamentos relativos. Esta verificação é realizada através de observações entre eles.

Quanto ao distanciamento destes pontos fixos em relação à rede de referência a mesma norma recomenda limites máximos de 3000, 300 e 100 km para as ordens de precisão AA, A e B, respectivamente. Porém, também deve ser observado outro limite dado em função do espaçamento máximo (d) entre o centro da região da rede de monitoração e os pontos que a constituem, devendo estes ser menores que $100d$, $10d$ e $7d$ em conformidade com as ordens acima estabelecidas.

Recomenda-se também o emprego de uma quantidade mínima de pontos de controle, distribuída em torno do centro da rede de referência, segundo os quadrantes desta. Para as ordens AA e A deve haver ao menos um ponto para cada quadrante e para a ordem B pode-se distribuir os pontos fixos por três dos quadrantes. Verifica-se, portanto, que prevalece uma recomendação de 3 a 4 pontos fixos por rede de

monitoração. Este procedimento é necessário para que se possam monitorar eventuais deslocamentos entre os vértices da rede de apoio e da rede de referência.

4.3.4 Rede Geodésica de Pontos de Referência

A mensuração de deslocamentos requer o uso de pontos ou vértices de referência nas proximidades da estrutura, adequadamente estabelecidos, de forma que as medidas possam manter a acurácia e a precisão, necessárias, tanto em curto como em longo período de tempo, ou ainda sob outras hipóteses, seja possível conhecer precisamente seus eventuais deslocamentos. Trabalhos profissionais desenvolvidos pelo autor em pontes estaiadas levam à conclusão de que em casos de monitoração haveria maior eficiência no acompanhamento topográfico do processo construtivo e na monitoração da estrutura se a rede de referência fosse concebida desde o projeto da estrutura e pudesse ser utilizada durante a fase construtiva, pelas seguintes razões:

- a) durante o processo construtivo de uma estrutura podem surgir deslocamentos não previstos resultantes de esforços produzidos por não previstos inicialmente ou eventos acidentais;
- b) a monitoração geométrica durante o processo construtivo contribui para o melhor conhecimento sobre o comportamento estrutural à medida em que se alteram os esforços;
- c) a estrutura tem longo período de duração e necessita ser monitorada durante sua vida útil, sendo desejável que se tenha um acompanhamento desde o princípio da construção;
- d) os fenômenos que provocam os deslocamentos podem perdurar ou reincidir;
- e) as medidas produzidas em diferentes épocas e sistemas de referência têm difícil interpretação e impõem falta de certeza nas determinações de deslocamentos e diagnósticos sucessivos, acarretando em perda de informações, que de outra forma poderiam trazer maiores contribuições para a monitoração e compreensão dos modelos e
- f) A realização de redes de referência após a fase de construção de uma

estrutura pode ser prejudicada por problemas diversos, advindos da falta de previsão de tais dispositivos, acarretando perda de eficiência bem como elevação dos custos durante a fase do monitoramento.

Destes pontos referenciais se fazem as observações para os pontos estruturais ou alvos neles instalados, portanto, a rede de referência tem um papel crítico na monitoração. Os seguintes aspectos devem ser considerados capitais: a estabilidade dos marcos e por consequência das suas coordenadas; a capacidade da rede em proporcionar confiabilidade e redundância nas observações para os pontos a serem monitorados; a magnitude e a tendência dos deslocamentos dos pontos.

O primeiro está relacionado ao local, ao tipo e condições de estabilidade do solo e ao tipo de marco, entre outros fatores que podem afetar a estabilidade deste último. A rede de referência deve proporcionar estações estáveis para a instrumentação com as quais se farão as observações. É necessário prover a capacidade de monitoração da própria rede de referência, através do vínculo com pontos de controle e através do vínculo com os demais pontos da mesma rede. Verificações a cada campanha de monitoração devem ser realizadas.

O segundo aspecto está relacionado à capacidade de cada vértice em proporcionar observações para o maior número possível de pontos a serem monitorados, bem como poder ser monitorado ao menos de dois outros pontos da rede de referência e de controle. Idealmente a rede de referência deve ser envolvida pelos pontos de controle e envolver a estrutura a ser monitorada proporcionando condições adequadas para minimizar a propagação de erros por proporcionar maior redundância, melhor condicionamento geométrico, entre demais fatores que poderão influenciar as observações. Na figura 4.4 é mostrada, como exemplo, uma rede de referência para uma barragem.

Os demais aspectos abrangem o projeto geométrico da rede de referência que tende a ser mais complexo do que aquele de uma rede geodésica normal quando então o objetivo é produzir somente posições dentro de um determinado padrão. Diferentemente desta última, o objetivo principal é determinar analisar os deslocamentos entre épocas ou períodos, devendo-se para isso projetar a rede de

forma que seja possível perceber os vetores de deslocamento com maior sensibilidade observando-se a direção e sentido em que tendem a ocorrer.

Podem ainda ser geradas redes complementares com objetivo de controle da principal ou para monitoração específica de partes da estrutura. Assim podem ser estabelecidos conjuntos de pontos regionais para obter informações sobre a sísmica no entorno de um barramento ou para monitorar elementos específicos da estrutura.

No caso de pontes, devido à forma longilínea e a variabilidade de ambientes que podem circundá-las, as características acima citadas serão adequadamente proporcionadas se o projeto de monitoração for considerado desde o projeto da estrutura. Caso se proceda ao contrário poderá ser mais difícil atendê-las a contento, em especial no meio urbano, pois o estabelecimento da rede concorrerá com vários fatores em sentido contrário a sua consecução, tais como: espaço físico exíguo, previsão orçamentária e segurança para as operações de monitoração e dos equipamentos.

FIGURA 4.5: IDEALIZAÇÃO DE UMA REDE DE REFERÊNCIA EM UMA BARRAGEM.

Adaptado de: US Army Corps of Engineers (2002).

4.3.5 Rede Geodésica de Pontos e Alvos de Monitoração

Os pontos e alvos de monitoração compõem a rede diretamente vinculada à estrutura e sobre os quais se tem interesse em conhecer os deslocamentos. Como primeiro passo estes pontos devem ser definidos pelo projetista da estrutura que também fornecerá a expectativa do deslocamento máximo (D_{max}) prevista. Esta deve ser a primeira informação a ser recebida do projetista da rede, sendo uma informação primordial sem a qual não é possível prosseguir adiante.

A distribuição espacial e a geometria do conjunto de pontos de monitoração também predominam sobre o projeto da rede de referência, pois esta deve ser concebida para avaliar seus deslocamentos com alta confiabilidade. O referido conjunto pode formar também sub-redes e seus pontos podem ser ocupados como estações dependendo da estrutura e das informações que devem ser produzidas pela monitoração. A figura 4.6 mostra vários efeitos, visualizados pelas elipses de erro, relativos à configuração geométrica entre os pontos da rede de referência e pontos de monitoração.

4.3.6 Monumentalização de pontos

As redes de referência são materializadas por pequenas estruturas, adequadas a comportar de forma eficaz os instrumentos e acessórios, bem como manter invariada a posição espacial. Tais estruturas podem ser agrupadas em três tipos conforme a sua aplicação:

- Referências de nível de alta precisão ou “*bench marks*” (FIGURA 4.7);
- Pilares de concreto armado (FIGURA 4.8 a 4.10);
- Suportes e demais dispositivos acoplados à estrutura para fixar alvos e outros acessórios dos instrumentos ou para se realizar diretamente as medições (FIGURA 4.9 a 4.13).

A operação que envolve a construção, implantação ou instalação destas estruturas denomina-se monumentalização. A distribuição destes dispositivos no entorno da estrutura, bem como nos locais a determinar os deslocamentos, deve obedecer a uma série de critérios avaliados em cada caso. Enumeram-se, abaixo, alguns destes critérios que devem ser contemplados pelo projeto de monitoração.

- Idealmente todos os pontos em especial os pilares e referências de nível devem ser monumentalizados de forma a serem estáveis por igual período de tempo previsto para a duração da estrutura;
- Os locais escolhidos para os vértices de referência devem compatibilizar os requisitos necessários à segurança (vandalismo, assalto, insolação e descargas elétricas, entre outros) do monumento, do observador e dos instrumentos; deve-se ter em conta ainda a tecnologia empregada, maior ou menor sensibilidade em mensurar os pontos a serem monitorados, a logística das operações, entre outros;
- Para evitar efeitos tais como os devidos à retração do concreto e ao soerguimento da estaca, por exemplo, as normas EM 1110-2-1009 do

Corpo de Engenheiros do Exercito Norte Americano recomenda que o monumento esteja construído há pelo menos 1 ano antes do uso; se esta condição não for possível, o pilar do ponto de referência deve ter sido construído há pelos menos 1 mês antes da determinação de suas coordenadas.

- Os dispositivos devem ser construídos considerando-se:
 - precisão na forma e dimensões;
 - padronização,
 - resistência de materiais às intempéries, desgaste excessivo e vandalismo,
 - estabilidade nas suas dimensões e posição.
- Qualquer destas estruturas deve proporcionar um ponto inequívoco para referenciar as medições ou fixar instrumentos e dispositivos precisamente, de forma que a fixação se o faça sempre na mesma posição com a mínima margem de erro, mesmo que as observações sejam realizadas de direções distintas. Instrumentos tais como teodolitos e estações totais devem ser fixados de forma a impossibilitar também rotações, o que pode ser conseguido com as tradicionais placas de pilar ou sistemas de centragem forçada tais como, por exemplo, o modelo UFPR, figura 4.9b. Observa-se que as antenas de receptores também podem requerer fixação, como exemplo de sistemas deste tipo cita-se IBGE 2006. Caso haja impossibilidade desta condição devem ser viabilizadas medidas compensatórias eficientes.

FIGURA 4.8: PILARES PARA CENTRAGEM FORÇADA.
Fonte: Pacileo Netto (1989).

(a)

(b)

(c)

FIGURA 4.10: EXEMPLOS DE SISTEMAS DE CENTRAGEM FORÇADA, (a) USP, (b) UFPR E (c) IBGE.
Fonte: b e c IBGE (2006).

4.3.7 Programação de observações.

O processo de se realizar observações com alta precisão requer maior planejamento e preparo com necessária antecedência. Assim, como primeiro passo, deve-se ter em mãos um mapa da região e uma planta do local e da estrutura. Após estudos preliminares para o entendimento de problemas que possam se apresentar deve-se promover visitas técnicas para reconhecimento dos locais e em seguida adequar o planejamento.

Chama-se a atenção para que, antes de verificar os locais dos pontos da rede de referência, devem ser reconhecidos os pontos a serem monitorados.

Com estes documentos e informações é possível dar início a um planejamento e um projeto preliminar, bem como definir a princípio os prováveis locais para se implantar os pontos de referência, esboçando previamente uma rede. Ao realizar a visita devem ser verificados:

- os pontos a serem monitorados indicados pelo projetista;
- os locais identificados por apresentar potencial para implantar os marcos da rede;
- os fatores que possam prejudicar a recepção de sinais, a colimação em alvos ou acentuar os efeitos da refração vertical e horizontal nas visadas;

- as linhas de visada quando necessárias;
- as condições de segurança em cada ponto;
- as influências do meio ambiente
- os locais que possam proporcionar melhor logística às operações (energia, abrigo, base de operações, etc.) e
- os demais aspectos influentes nos trabalhos de campo para a coleta de dados.

Feito o reconhecimento do terreno, deve-se dar seqüência ao projeto geométrico da rede.

Havendo obstruções parciais em locais onde se devem implantar marcos, é necessário elaborar mapas de obstruções para o planejamento de missões. A figura 4.14 dá um exemplo de um mapa celeste com interferência no quadrante nordeste. O mapa pode ser elaborado com uso de um teodolito observando-se azimutes e elevações dos contornos do objeto a partir da estação onde deverá estar a antena. Estas informações sobre as obstruções são necessárias para a programação de observações mais precisas, pois permitirão obter a quantidade, a distribuição de satélites e o fator DOP em cada ponto, avaliando o impacto no conjunto dos pontos a observar simultaneamente.

A avaliação, geralmente, é processada no módulo de planejamento de missões de programas de pós-processamento GPS. Os dados de efemérides devem ser previamente coletados, com a maior proximidade possível ao período de campanha de campo e por várias horas de observação. Com este procedimento procura-se realizar as medições durante o que se convencionou chamar de *janela de melhor configuração*. Esta consiste no intervalo de tempo, no decorrer de um dia, no qual há a melhor configuração de satélites em relação a um dado local. Assim será possível avaliar os melhores horários para realizar as observações, estimar o tempo de cada sessão, coordenando-o com os deslocamentos das equipes, por exemplo.

A figura 4.15 apresenta o gráfico de disponibilidade de satélites e GDOP para uma rede de monitoração. Considerando as influências das obstruções mostradas na figura 4.14 é possível verificar os períodos disponíveis para o GDOP menor que 4 e a disponibilidade maior que 7 satélites. As janelas de melhor configuração restringem as sessões de observação a poucos períodos, obrigando ao cumprimento de uma programação rígida e dilatando o período da campanha de observação.

FIGURA 4.15: GRÁFICO DE GDOP CONSIDERANDO AS OBSTRUÇÕES ACIMA PARA O MESMO CONJUNTO DE PONTOS.

O conhecimento prévio dos itinerários e dos tempos despendidos no deslocamento entre as estações é um fator importante para que se possa cumprir a programação das sessões segundo as janelas de melhor configuração. A título de exemplo, a tabela 4.3 demonstra um trecho de roteiro para orientação que deve ser distribuído para cada equipe de rastreo, considerando o planejamento acima.

TABELA 4.3: TABELA DE PROGRAMAÇÃO DE SESSÕES DE RASTREIO GPS

DATA 27/6/2006								
SESSÃO	VERT.	RECEP.	VERT.	RECEP.	DESLOC.	T. INI	DUR.	T. TERM
1	P3	833	P4	093		10:40:00	00:35:00	11:15:00
					00:10:00			
2	P2	833	P4	093		11:25:00	00:35:00	12:00:00
					00:15:00			
3	P2	833	P3	093		12:15:00	00:35:00	12:50:00
					00:15:00			

4.3.8 Coleta de dados.

4.3.8.1 Rede de referência

O emprego de dois receptores na coleta de dados em campo se requer planejamento de uma forma mais simples, atendendo a critérios de logística, das janelas de melhor configuração e outros fatores que possam interferir nas observações, detectados e equacionados no planejamento de missões. Assim, a cada sessão se produz um vetor independente. Quando operam em conjunto um número acima de três receptores, a produção de vetores independentes aumenta substancialmente e surgem os vetores triviais (correlacionados). Agregam-se, portanto, novas dificuldades ao problema, as quais remetem à necessidade de racionalizar, procurando maior eficiência e redução de custos nas operações de campo. Estes aspectos são tratados em maior profundidade em FGCC (1989) e SEEBER (2003). Em qualquer das situações torna-se essencial a comunicação entre

as equipes, pois, pode acontecer imprevistos, o que requer boa comunicação para minimizar seus efeitos sobre a programação.

4.3.8.2 Carregamento da Estrutura.

Os deslocamentos podem decorrer de fenômenos ou eventos não intencionais, podem ser inerentes a própria utilização da estrutura, ou ainda, podem ser provocados por excitação. Assim, os deslocamentos poderão ser originados por:

- a) Carregamento estático, por exemplo: veículos com determinadas cargas estacionados em locais predefinidos;
- b) Carregamento dinâmico, por exemplo: tráfego normal de veículos, passagem de cargas espaciais ou ação de ventos.

Nos casos em que mais de um tipo de instrumentação é usado ou está sendo empregada alguma forma de excitar a estrutura é recomendado que todos os aparelhos operem com a mesma base de tempo. Os equipamentos GPS são importantes ferramentas também neste aspecto, pois, podem gerar um padrão único de tempo e posição. Para citar alguns exemplos, é possível instalar um rastreador GPS geodésico em um caminhão e obter a sua trajetória ao passar por uma ponte sob monitoração, correlacionando-a a outras medições no mesmo referencial, considerando tempo e posição ou somente um dos dois. Outros equipamentos, tais como: acelerômetros, extensômetros e transdutores de deslocamento podem adotar o mesmo padrão sem emprego de receptores que tenham custo elevado, pois, receptores dedicados a este fim custam relativamente pouco. Uma das vantagens da tecnologia de posicionamento por satélites é sua capacidade de integração com outras tecnologias.

4.3.8.3 Pontos a serem monitorados

Os deslocamentos dos pontos a serem observados devem ser relacionados com o posicionamento do carregamento (estático ou dinâmico) e o intervalo entre as

observações. Portanto, cada tipo de monitoração de deslocamentos terá características distintas neste aspecto. Com relação ao tempo, frequência e quantidade de observações, aqueles com carga estática apresentam características de coleta de dados com maior prazo para execução, maior intervalo entre as medidas e menor quantidade de dados a serem processados. O carregamento dinâmico, geralmente, requer a execução durante um evento de curta duração, durante o qual deverá ser realizada uma quantidade de medições com frequência dez vezes superior à frequência máxima esperada para a resposta da estrutura.

A preparação do momento da coleta de dados é crucial para o sucesso das observações, principalmente quando há carga dinâmica. Deve-se considerar que durante o evento, o qual não será repetido com facilidade provavelmente, todos os elementos devem operar de forma coordenada, sob circunstâncias que ainda podem ser agravadas por riscos, tal como no caso de pontes com tráfego. Pequenos detalhes podem provocar a perda de parcela significativa dos dados ou então introduzir dados espúrios no conjunto de observações, o que dificultará ou inutilizará o tratamento e a análise. Por este motivo tornam-se convenientes testes antes e após as montagens dos equipamentos no sítio de monitoração.

4.3.9 Processamento e tratamento de dados

O processamento dos dados gerados pelos receptores é uma fase do processo de realização de redes e da monitoração que requer os devidos cuidados. Embora se tenha empregado no primeiro caso programas comerciais, dotados de vários módulos e ferramentas com interface amigável, o processamento de vetores não deve ser tomado como uma atividade automática, entendida como o simples operar do programa. O processamento adequado requer atenção, em especial nos casos aqui tratados. Com frequência há necessidade de suprimir satélites, alterar ângulos de mascaramento, experimentar outros diferentes parâmetros e diferentes tipos de soluções, até que se atinja aquela que proporcione, sob análise, resultados estatísticos mais adequados. Os testes e modelos de soluções podem variar de programa a programa, mas todos dispõem os resultados das soluções associadas a testes estatísticos. Por exemplo, no programa Trimble Goemetics Office v 1.5, empregado

nesta pesquisa para processamento da rede, a solução de um vetor pode ser avaliada por um conjunto de parâmetros, sendo alguns deles (TRIMBLE, 2001):

- a) tipo de solução, se os valores de N foram determinados (fixados) ou não (flutuante);
- b) taxa da solução fixa (*Ratio*), obtida pela razão entre a probabilidade de acerto da melhor solução sobre a probabilidade de acerto da segunda melhor solução de ambigüidades . Deve-se obter valores altos, pelo menos acima de 3 (Leick: informação verbal);
- c) a variância de referência (*Reference Variance*), variância a posteriori da unidade de peso do processo de ajustamento da solução, deve permanecer entorno de 1 e
- d) desvio médio quadrático (*RMS*) ou resíduo das observações de distância, deve ser o menor possível, quanto menor a separação entre os extremos da linha de base, tipicamente dentro do centímetro para distâncias curtas e até poucos centímetros para distâncias longas, podendo analisar-se também a variação entre a solução flutuante e a fixa.

A boa análise da solução requer que estes parâmetros sejam avaliados em conjunto a cada solução testada de um mesmo vetor, até que se processe uma para a qual eles converjam para valores aceitáveis. Os vetores que não obtiverem resultados adequados devem ser eliminados ou observados novamente.

Concluída a fase de processamento das observações procede-se à fase de ajustamento vetorial de forma a obter uma análise da qualidade do conjunto de vetores e da rede propriamente dita. Este processo tem objetivos tais como detectar erros grosseiros ou enganos; efeitos determinísticos e estimar os efeitos estocásticos. Chama-se a atenção para o fato de que o ajustamento não melhora a precisão dos dados, e sim proporciona sua estimativa sob determinadas hipóteses e fornece o desvio mais provável das coordenadas.

O módulo de ajustamento do programa usado nestes cálculos emprega o método de ajustamento denominado de variação de coordenadas, cuja formulação geral matricial para se obter as coordenadas (parâmetros) ajustadas é apresentada abaixo:

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad 4.12$$

$$X^a = X^o + X \quad 4.13$$

onde:

- X é o vetor das correções
- X^a é o vetor dos parâmetros ajustados;
- X^o é o vetor dos parâmetros aproximados;
- A é a matriz das derivadas parciais das observações indiretas: azimuth, distância e diferença de altura, obtidas a partir das coordenadas aproximadas e calculadas com os vetores antes do ajuste;
- P é a matriz dos pesos, obtida pelo inverso das variâncias dos parâmetros;
- L é o vetor das observações menos o das observações ajustadas.

Os valores finais obtidos no ajustamento vetorial devem ser resultantes do ajustamento com injeção precedido do ajustamento livre. A solução final deve ser obtida pela fixação das coordenadas de controle.

Os resultados dos vetores tendem a ser otimistas, portanto, é normal no ajustamento de observações GPS o emprego de pesos. É necessário cuidado, pois, o uso indiscriminado, pode distorcer os resultados. Uma estratégia interessante é realizar ajustamentos teste com fixação de diferentes pontos dentro da rede e avaliar resultados estatísticos e deslocamentos em coordenadas. Recomenda-se proceder a várias verificações, inclusive de erros de fechamento de polígonos antes mesmo dos ajustes. Certos programas vão mais além, proporcionam testes que demonstram a percentagem de vetores redundantes, quantidade de estações independentes por vértice ocupado, conectividade de rede a pontos de controle, presença de polígonos abertos, de vetores dependentes, além dos erros de fechamento de polígonos.

Igualmente devem ser analisados parâmetros estatísticos das soluções de ajustamento tais como: a variância da unidade de peso *a posteriori* aceita pelo teste de *chi* quadrado, considerando-se a hipótese $\alpha = 95\%$, resíduos normalizados, testes de detecção de erros, histogramas dos resíduos normalizados e elipses e elipsóides de erros. Deve-se expressar os resultados com nível de confiança de 95%. Para estudos mais aprofundados sobre ajustamento de observações recomenda-se a consulta a GEMAEL (1995); LEICK(1995); MONICO(2005).

5 ENSAIOS REALIZADOS, ANÁLISE DOS DADOS E PROPOSTA DE METODOLOGIA DE MONITORAÇÃO DINÂMICA

5.1 Introdução

Há mais de uma década se verificam pesquisas no exterior, e mais recentemente no Brasil, sobre a viabilidade do uso de tecnologias de geodésia espacial na monitoração de estruturas, principalmente aquelas que apresentam deslocamentos com vários centímetros de amplitude. Entretanto, a monitoração em estruturas com deslocamento sub-centimétrico ainda apresenta desafios, principalmente no que se refere à determinação de posições tridimensionais. As perspectivas apresentadas por este tipo de tecnologia vêm experimentando avanços neste campo da engenharia de mensuração. Em razão dos resultados de aplicações de caráter dinâmico, a indústria de receptores vem adequando-os em gerações sucessivas e cada vez mais dedicadas, incrementando, por exemplo, a taxa de amostragem para 100 Hz, a automatização e controle à distância, a resistência às intempéries, a precisão nominal, o desenvolvimento de programas e sistemas dedicados e a integração com acelerômetros e outros equipamentos.

A seguir apresentam-se dois dos ensaios realizados com objetivo de se avaliar uma metodologia da aplicação da tecnologia de posicionamento por satélite na monitoração de estruturas. O primeiro caso descreve um experimento realizado na base de calibração de distanciômetros eletrônicos da EPUSP empregando-se um shaker e um transdutor de deslocamento (TD), com o objetivo de se investigar a capacidade do GPS detectar os deslocamentos produzidos pelo shaker e medidos também pelo transdutor. O segundo relata um ensaio realizado no viaduto ascendente 19 (VA-19) da rodovia dos Imigrantes, com objetivo de detectar os deslocamentos naquele viaduto e as frequências, deles decorrentes. Ambos possuem caráter dinâmico, pois no primeiro caso o shaker oscila na direção vertical com frequências conhecidas e o viaduto experimenta deslocamentos induzidos pelo ao tráfego.

No primeiro tipo de experimento optou-se por avaliar somente os deslocamentos verticais (altitude geométrica), pois a determinação da altura

geométrica se realiza com erros de magnitude 3 vezes maiores do que ocorre nas coordenadas planimétricas.

A análise dos dados dos dois experimentos foi realizada primeiramente com emprego de filtragens e de transformada de Fourier, apresentando-se ao final uma complementação com transformada de ondaletas em algumas das séries temporais.

Com base em algumas pesquisas nesta área, observadas no Brasil e no exterior, na experiência profissional deste autor associada à tecnologia GPS e nos ensaios realizados nesta pesquisa, no final deste capítulo, apresenta-se uma proposta básica de metodologia para monitoração de estruturas.

5.2 Ensaio com shaker e transdutor de deslocamento

Em dezembro de 2002 verificou-se que o Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da Escola Politécnica da USP possuía um *Shaker* eletrodinâmico, marca APS modelo 113, número de série 778.

Em janeiro de 2003 foram realizados dois experimentos com este “shaker” e os dois receptores Javad Legacy, com antenas choke ring, adquiridos na época pelo Laboratório de Topografia e Geodésia da EPUSP (LTG-EPUSP) para experimentos desta natureza.

Os equipamentos foram especificados para os trabalhos desta pesquisa e, além da antena choke ring, contam com taxa de aquisição de dados de 20 Hz, algoritmo de redução de multicaminhamento, memória de 80 Mb e capacidade de observação de sinais L1, L2, códigos C/A e P.

Os resultados do primeiro experimento não foram considerados satisfatórios e tomou-se a decisão de repeti-lo, desta vez empregando um dispositivo que controlasse os movimentos senoidais do shaker de forma que estes tendessem a manter a mesma amplitude, pois tal dispositivo estava avariado por época do primeiro experimento. A nova coleta de dados se realizou em 21-11-03. As condições em que foram realizados os experimentos são descritas, em termos gerais, a seguir.

Com o objetivo de conseguir um acoplamento adequado da antena "choke ring" com a mesa superior do "shaker" e deste no pilar, foram projetados e construídos dois dispositivos conforme pode ser observado na figura 5.1. Desta forma o shaker permaneceria centrado em uma posição conhecida e a antena seria firmemente afixada ao dispositivo, podendo ser correlacionada à posição do pilar.

Para avaliar a geometria satélite/receptor foi realizado o planejamento de missões, cujos gráficos de GDOP (linha ciano) e disponibilidade (área com hachuras em verde) no decorrer do tempo (abscissa) podem ser vistos nas figuras 5.2.

FIGURA 5.1: ANTENA CHOKE RING ACOPLADA AO SHAKER SOBRE O PILAR 2 DA BASE USP. NO DETALHE À DIREITA OBSERVA-SE O TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO, ACOPLADO.

Neste experimento foram adotados os seguintes procedimentos:

- O equipamento GPS foi ajustado para operação em modo cinemático;
- A taxa de gravação do GPS foi ajustada em 20 Hz (0,05 segundos).

- As sessões entre o repouso, a vibração e o repouso da mesa do "shaker" foram gravadas em modo cinemático contínuo, no procedimento do método semi-cinemático do receptor. O período de oscilação está compreendido nos horários apontados na tabela 5.1;
- No período de repouso a sessão foi gravada no modo estático do método semi-cinemático;
- Empregou-se um cilindro de metal, com comprimento de 100 mm entre a mesa do shaker e a antena.
- O receptor base (Horácio, n/s 8RR3VQ40740) foi instalado no pilar P0 e o móvel (Lucinda, n/s 8PQN92EVQWW) foi instalado no P2; portanto, a distância que separa os dois é de 68,166m;
- A amplitude precisa medida com um Transdutor de Deslocamento (TD) Gefran, modelo PY2 F50S, n° 01120092 e registrada em arquivo através do programa Aqdados, desenvolvido pela Lynx Eletrônica Ltda.

FIGURA 5.2: GRÁFICO DE DISPONIBILIDADE DE SATÉLITES E GDOP (ORDENADAS) NO DECORRER DO PERÍODO DE OBSERVAÇÃO (ABSCISSAS) DURANTE O EXPERIMENTO REALIZADO NO DIA 21/11/03.

**TABELA 5.1: OBSERVAÇÕES DO 3º EXPERIMENTO, DIA 21/11/03,
ANALISADAS.**

Início (TGPS)	Fim	Frequência (Hz.)	Arquivo do TD	Obs. HI = 0,690 m
14:04:30	14:06:30	1	shake1	Movimento
14:11:29	14:13:29	2	Shake2	Movimento
14:15:21	14:17:21	4	Shake3	Movimento

Os dados foram processados no método cinemático no programa Pinnacle v. 1.0, próprio dos receptores Javad Legacy empregados. As características do processamento são apresentadas a seguir:

- modo de processamento: stop-and-go (v.01.22.053), L1&L2 c (iono-free), com correção de variações de centro de fase;
- ângulo de mascaramento: 15°;
- efemérides transmitidas e
- solução de ambigüidades fixa, taxa 99,94
- PDOP variando entre 2,19 e 1,7;
- quantidade mínima e máxima de 7 e 8 satélites e
- as ambigüidades foram fixas após 50 épocas (2,50 seg)

Os dados do TD, na frequência de aquisição de 20 Hz, foram exportados do programa Aqdados, em formato texto, para serem verificados em uma planilha Excel e posteriormente separados em arquivos segundo a frequência de oscilação do shaker. Processo semelhante foi realizado com os dados GPS, exportado do programa Pinnacle e classificados em planilhas.

Os resultados obtidos para os deslocamentos em altura geométrica, na frequência de 1, 2 e 4 Hz, tanto do GPS como do TD foram inseridos no programa Matlab v 6.5 e processados com a ferramenta de processamento de sinais Sptool.

Metodologia aplicada neste experimento:

- os dados foram separados em amostras contendo 1024 ou 2048 registros (2^k);
- antes do processamento propriamente dito elaborou-se um programa para calcular as médias aritméticas das alturas geométricas e dos deslocamentos medido com o TD, formando outro vetor coluna contendo os desvios para que se pudesse verificar a frequência pela transformada de Fourier;
- com o sinal bruto, ou seja, tal como determinado, gerou-se um gráfico para avaliação da amplitude;
- no sinal dos desvios aplicou-se a análise de Fourier para verificar se havia correspondência com a frequência de operação do shaker, filtrando-se o sinal ou não conforme o caso;
- constatada a correspondência com a frequência do shaker aplicou-se um filtro passa banda para gerar sinais sem os efeitos perturbadores do comportamento do sinal naquela faixa;
- o novo sinal filtrado foi analisado para avaliar a amplitude resultante.
- considerando cada período de oscilação do shaker em uma dada frequência, analisaram-se os dados produzidos pelo TD para depois comparar com aqueles determinados pelo GPS.

5.2.1 Análise dos resultados relativos ao experimento do shaker

A figura 5.3 apresenta o gráfico do sinal tal como obtido pelo TD durante o período de oscilação a 1 Hz. O eixo x representa o tempo em segundos e o eixo y os deslocamentos medidos na mesa em metros. Nota-se um pequeno efeito ascendente, bem como variações no movimento oscilatório do shaker, entretanto pode-se observar que há uma regularidade nos deslocamentos de pico a pico. Medindo-se em dez locais ao longo do gráfico obteve-se um valor médio de 0,0169 m para estes deslocamentos, com desvio de 0,2 mm. A amplitude conforme este valor médio é da ordem de 8,4 mm.

A média aritmética destes valores não representa o ponto médio do deslocamento, conforme mostra o gráfico da figura 5.4. Tomando-se o valor zero

como referência no gráfico e medindo-se 10 picos positivos obteve-se a média de 0,0104 m para o deslocamento em relação à média de 0,0216 m.

A transformada de Fourier da série de deslocamentos do shaker, feita sem a filtragem para avaliação em um primeiro momento, é mostrada na figura 5.5, onde se percebe claramente a maior amplitude de energia na frequência de 1Hz.

Chama-se a atenção do leitor para que observe que nos gráficos de sinais a unidade do eixo de abscissas é a época, equiespaçadas de 0,05 segundos e no de ordenadas é o metro. Nos gráficos de função de densidade espectral (PSD) as unidades da abscissa e da ordenada é Hz e m^2/Hz , respectivamente.

Em uma segunda avaliação procedeu-se a filtragem dos dados para extrair os ruídos em baixa frequência, aplicando-se, para tanto, o filtro passa alta. Obteve-se assim um sinal sem os efeitos observados anteriormente. Com esta segunda avaliação

objetivou-se avaliar se a filtragem empregada poderia comprometer os valores dos deslocamentos. O espectro também demonstrou a frequência em que operou o shaker. Nas figuras 5.6 e 5.7 verificam-se estes resultados. Os dez deslocamentos medidos acima do valor nulo no gráfico da figura 5.6 resultaram na média de 0,0108 m.

Em seguida repetiu-se a metodologia para os dados do GPS coletados dentro do mesmo período que o transdutor de deslocamentos. Na figura 5.8 pode-se verificar o comportamento dos desvios em relação à média 725,4405 m. A série apresenta variações distintas daquelas demonstradas pelos dados do TD, com um componente de baixa frequência e outra de alta. No primeiro predominam efeitos de multicaminhamento dos sinais e no segundo está também o comportamento do shaker. Observa-se, no início da série, a ocorrência de variações da ordem de 0,1 m.

A figura 5.9 mostra o espectro destes dados, onde se verifica um pico em 1Hz e um harmônico em 2Hz. Nota-se também os efeitos dos ruídos, em baixa frequência, removidos a posteriori na figura 5.10 após filtro passa alta.

A amplitude se reduziu na maioria das épocas, à exceção do trecho inicial que já apresentava valores excessivos nos dados originais. Na figura 5.10 pode-se ver a linha tracejada indicando a amplitude de 0,0108 m determinada nos dados do TD. No princípio da série, de 5,95 até 16,95 segundos, se verificam valores elevados de 0,022 m a 0,0135 m, entretanto, pode-se observar uma tendência de proximidade com valor obtido pelo TD a partir de 25 segundos. Neste trecho a variação se dá entre os extremos 0,0138 m a 0,0046 m.

Nos gráficos seguintes apresentam-se os resultados relativos ao período de oscilação do shaker em 2 Hz. Apesar da amostragem de 20 Hz, nos dados do TD, nesta frequência já se verificam efeitos que possivelmente podem ser atribuídos ao alisamento. Na figura 5.11 pode-se verificar este efeito. Neste exemplo, os dados do shaker mostram uma forte deriva ascendente a partir da época 1400. Este trecho também apresenta diminuição na amplitude, que até a proximidade da época acima é da ordem de 0,0054 m. Após filtragem EQFIR passa alta 0,705 Hz, o trecho em deriva chega ao final com 0,0035 m, conforme mostrado na figura 5.12.

FIGURA 5.12: GRÁFICO DOS DADOS DO TD SOBRE O SHAKER, OSCILANDO EM 2 HZ, DESLOCAMENTOS EM M, APÓS FILTRAGEM.

Os dados, compondo uma série de 2048 medidas, foram separados nas primeiras 1024 épocas. Os resultados obtidos com os desvios em relação à média da série de 1024 épocas são mostrados no gráfico 5.13. Na figura 5.14 A e B, pode-se verificar os espectros das duas séries. Observa-se que os dados não sofreram alteração significativa nos deslocamentos antes e depois da edição da série original, permanecendo aqueles anteriores à época 1400 com valor de 0,0055 m.

FIGURA 5.13: GRÁFICO DOS DESVIOS EM RELAÇÃO À MÉDIA DOS DADOS DO TD SOBRE O SHAKER, OSCILANDO EM 2 HZ, DESLOCAMENTOS EM M.

FIGURA 5.14: ESPECTRO DOS DESVIOS EM RELAÇÃO À MÉDIA DOS DADOS DO TD SOBRE O SHAKER, OSCILANDO EM 2 HZ.
A) 2048 ÉPOCAS COM FILTRO. B) 1024 ÉPOCAS SEM FILTRO.

Na figura 5.15 apresenta-se os desvios de altitude geométrica (GPS) em relação à média, verificando-se uma variação total de 0,120 m. Na figura 5.16 está contido o seu espectro após filtragem EQFIR passa alta, acima de 0,86 Hz.

FIGURA 5.15: DESVIOS DE ALTURA GEOMÉTRICA EM RELAÇÃO À MÉDIA, DADOS DO GPS SOBRE SHAKER A 2 HZ, SEM USO DE FILTRO.

FIGURA 5.16: ESPECTRO DOS DESVIOS DE ALTURA GEOMÉTRICA EM RELAÇÃO À MÉDIA, DADOS DO GPS SOBRE SHAKER A 2 HZ, COM FILTRO.

A figura 5.17 mostra os dados filtrados de desvio de altitude os deslocamentos atingem valores de 0,0055 m. Pode-se verificar a semelhança da série

de 2048 épocas do TD, após filtragem contida na fig. 5.12; o deslocamento no final da série de ambas é de 0,0035 m. Os resultados do GPS acompanharam a amplitude da deriva observada nos dados do TD.

Analisando a série dos deslocamentos do shaker em oscilações com frequência de 4 Hz, medidos com o TD, verifica-se novamente uma deriva (0,009 m pico a pico), figura 5.18. Aparentemente os dados apresentam efeito de alisamento ou o shaker não foi acionado com uma função senoidal como esperado. Medindo-se os deslocamentos dos desvios verifica-se uma amplitude entre 0,0085 m e 0,0023 m, conforme seqüência mostrada na figura 5.19.

O espectro resultante do sinal do TD em 4 Hz apresenta um efeito semelhante ao do GPS, onde os ruídos de menor frequência predominam em relação ao pico de 4 Hz. Portanto, experimentou-se um filtro EQFIR passa alta para 1 Hz e passa banda para a faixa de 3 a 5 Hz. Os espectros podem ser vistos nas figuras 5.20 e 5.21. O segundo filtro produziu um sinal com amplitudes mais homogêneas, valores de 0,0007 m, do aquele visto na figura 5.19 combinado com o sinal original.

FIGURA 5.20: ESPECTRO DO SINAL DO TD COM O SHAKER OSCILANDO A 4HZ (FILTRO PASSA ALTA).

FIGURA 5.21: ESPECTRO DO SINAL DO TD COM O SHAKER OSCILANDO A 4HZ (FILTRO PASSA BANDA).

FIGURA 5.22: DESVIOS DO TD SOBRE SHAKER A 4 HZ. FILTRO (PASSA ALTA).

FIGURA 5.23: DESVIOS DO TD COM O SHAKER OSCILANDO A 4HZ (FILTRO PASSA BANDA).

Os resultados verificados nas figuras 5.22 e 5.23 mostram valores de deslocamentos da ordem de 0,0016 e 0,0007. Contudo estes resultados não se apresentam como confiáveis.

As figuras 5.24 a 5.26 mostram os resultados da metodologia aplicada sobre os dados de altitude geométrica obtidos com o GPS no mesmo período de tempo analisado acima para o TD. Os desvios chegam a atingir 0,041 m acima da média e observa-se o comportamento típico de multicaminhamento representado pelas variações com maior comprimento de onda. A figura 5.25 mostra o espectro resultante após o uso de um filtro passa alta, acima de 1 Hz. Observam-se vários picos com magnitudes semelhantes ao de 4 Hz, sendo o de 1,3 Hz ainda maior. Na figura 5.26 apresenta-se o sinal filtrado onde se vê que os desvios variam dentro de uma faixa de 0,01 m acima do valor médio, diferindo do sinal do TD.

Nessa série temporal do ensaio, tanto o sinal gerado pelo TD quanto o resultante das observações GPS apresentam características diferentes do comportamento dos sinais das séries anteriores. Prováveis hipóteses poderiam ser a frequência de amostragem menor que o necessário ou troca indevida da função proporciona a movimentação do shaker.

Observa-se que o GPS foi capaz de detectar as frequências de oscilação do shaker nos casos de deslocamentos em 1 Hz e 2Hz, podendo-se confirmá-lo com os dados do transdutor de deslocamentos. No caso de 4 Hz isto não pode ser afirmado para a série temporal produzida com GPS.

5.3 Ensaio com carga dinâmica, Rodovia dos Imigrantes

5.3.1 Introdução

O sistema Anchieta Imigrantes compõe um sistema viário de 176 km que interliga a metrópole de São Paulo à Região Litorânea denominada Baixada Santista, que dá acesso ao porto de Santos, o maior do País e a uma das mais belas partes do litoral do Estado, características que geram forte fluxo de tráfego. Deste sistema faz parte a rodovia dos Imigrantes SP 160, inaugurada em meados da década de 1970. Com frequência semanal trafegam também cargas especiais que chegam a pesar mais de 500 t. A pista ascendente vence um desnível de mais de 700m na Serra de Paranapiacaba, sendo composta por viadutos construídos sobre pilares de concreto armado, com os tabuleiros apoiados em viga Gerber com 35 metros de comprimento, figura 5.27. Este cenário com cargas especiais chamou a atenção como um potencial candidato à realização dos experimentos deste trabalho. Os engenheiros Roberto Alves e Mario Mori da Empresa Figueiredo Ferraz, em reunião de 31-01-01, nos informaram que a flecha do viaduto, com a passagem de uma carga especial, seria aproximadamente de 0,02 m (carga de 350 t).

Para viabilizar a experimento foi necessário obter a aprovação da Concessionária Ecovias. Com a ajuda da empresa Figueiredo Ferraz e após aproximadamente um ano de trâmites do projeto básico foi dada a autorização em fevereiro de 2001.

Em seguida teve princípio a elaboração do projeto de mastros para suportar as antenas, da rede geodésica de referência, suas construções e implantações. Os primeiros experimentos puderam, então, ser realizados em janeiro de 2002.

A

B

FIGURA 5.27: A -VISTA GERAL DO VIADUTO VA-19, COM OS MASTROS.
 B – MODELO TRIDIMENSIONAL.
 Fonte: B - Penner (2002)

5.3.2 Estudo da região

Durante o processo de obtenção da licença para o experimento foi realizada uma avaliação da região e uma verificação de problemas de deslocamento que já ocorriam em um trecho, com potencialidade para a realização do experimento. Com o auxílio e as informações prestadas pelos engenheiros da Empresa Figueiredo Ferraz, foi consolidando um projeto para realização do experimento.

Após uma vistoria verificou-se que o local mais apropriado seria o viaduto VA-19, por apresentar características mais adequadas ao posicionamento GPS e por suas próprias características, tais como a altura em relação ao solo e proximidade com locais adequados à implantação das referências. Embora não represente interesse específico para este experimento observa-se que o VA-19 apresenta mais uma particularidade pelo aspecto de haver um lençol subterrâneo que produziu, por ao longo de anos, um empuxo em sentido sul, nas suas fundações causando um deslocamento lento. Naquele momento estava em construção um túnel com 300 m que faria a drenagem de aproximadamente $20 \text{ m}^3/\text{h}$, aliviando a carga produzida pelo lençol e, portanto, faria cessar os deslocamentos, o que aconteceu mais tarde. Devido a este fato o VA-19 tem sido monitorado por mais de uma década pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT.

Neste período inicial foram avaliados os locais possíveis para implantação das referências de forma a submeter um anteprojeto à Ecovias. Mediante vistoria e uso de um receptor GPS de navegação foram posicionadas feições de referência e identificados os pontos considerados adequados à construção de pilares estáveis. Estes dados foram lançados em uma imagem de satélite LandSat, com objetivo de simples visualização, figura 5.28.

Os locais escolhidos atendem às premissas relativas a observações GPS de alta precisão, à estabilidade do solo e aos aspectos logísticos para apoio às equipes; considerou-se ainda as questões relativas às limitações ambientais e operacionais da Ecovias. Sob estas premissas foram finalmente definidos os seguintes pontos:

- Pilar **ECO2**: km 40, alça de acesso à Interligação Planalto da Rodovia dos Imigrantes com a Rodovia Anchieta, sentido Baixada, ponto localizado aproximadamente no centro da alça.
- Pilar **ECO3**: Interligação Planalto SP 141, aproximadamente no km 8+100m, canteiro central onde existe um maciço de rocha.
- Pilar **ECO4**: Rodovia dos Imigrantes km 56, área em frente à balança, lado esquerdo da rodovia.

Os pilares foram construídos entre outubro e novembro de 2001. Basicamente suas estruturas seguem o padrão demonstrado na fig. 5.29, com seção quadrada ou retangular. No caso do pilar ECO4 foi necessário elevar a sua altura para 3,5 m e a dimensão da seção para 0,4 m de maneira que a vegetação ao redor não prejudicasse a recepção de sinais.

Após a construção dos pilares foram instalados os dispositivos de centragem forçada, bem como uma chapa de aço inox para proteção do topo do pilar.

5.3.3 Projeto e instalação dos mastros

Durante a fase de aprovação pela Ecovias, com ajuda dos engenheiros da projetista Figueiredo Ferraz, foram definidos os pontos a serem observados na estrutura; abaixo é descrita a posição dos mesmos no viaduto:

- o primeiro (MST-1) no ponto médio da viga, lado direito em sentido a São Paulo;
- o segundo (MST-2) no ponto médio da viga, lado esquerdo em sentido a São Paulo e
- o terceiro (MST-3) na extremidade da viga, lado esquerdo em sentido a São Paulo.

Para que as observações não fossem perturbadas por multicaminhamento devido à passagem de veículos e de cargas seria necessário elevar as antenas acima da altura máxima permitida pelo gabarito dos túneis da rodovia, ou seja: 6m. Esta necessidade do projeto foi agravada com a impossibilidade de instalar qualquer dispositivo na parte interna ao guarda corpo no tabuleiro, devido a questões de segurança da rodovia. A única alternativa viável seria acoplar o dispositivo de fixação das antenas por fora do viaduto. Esta necessidade exigiu um projeto elaborado dos dispositivos, pois não seria conveniente que adicionasse movimentos ou vibrações em função dos deslocamentos da estrutura do VA-19.

A Figueiredo Ferraz, através do seu departamento de estruturas *off shore*, realizou estudos preliminares e verificou que os dispositivos deveriam ser em estrutura tubular de aço com diâmetro de 200 mm e paredes com espessura de 9 mm.

Estudos mais completos foram desenvolvidos em 2001 pelo Prof. Dr. Carlos Mazzilli do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da EPUSP, de forma que os mastros não gerassem vibrações em excesso ou movimentos que pudessem afetar as medições. Com esses estudos foram projetados os mastros e sua construção esteve a cargo da empresa Cald-Tec-Lev, que os concluiu em agosto de 2001, vide figuras 5.30 a 5.31. Devido às dimensões padrão de comercialização do material usado os mastros ficaram definidos com segue:

- Mastros
 - Comprimento 6900mm;
 - Diâmetro externo 202 mm;
 - Diâmetro interno 219mm;
 - Espessura da parede 8,5mm;
- espessura da chapa das abraçadeiras dos acoplamentos 12,5 mm;
- placa de suporte de fixação 245mm x 220 mm x 16 mm.
- peso aproximado do conjunto de cada mastro 350 kg

FIGURA 5.30: MODELO DO TABULEIRO COM OS MASTROS. DA ESQUERDA PARA A DIREITA: MST-3; MST-2 E MST-1.

FIGURA 5.31: MASTRO CONSTRUÍDO, DETALHE DO ACOPLAMENTO.

Para acoplar os mastros à estrutura do guarda corpo foram empregadas no mínimo quatro barras com rosca HAS com 12,7 mm x 165 mm, em aço inox SAE 4140, com ancoragem química ampolas plásticas HVU da Hilti, que conforme o fabricante é ideal para cargas dinâmicas e tem as seguintes propriedades de resistência a tração e cisalhamento, considerando-se o concreto com fck de 20 mpa:

- tração $\sigma_t = 2880$ Kgf;
- cisalhamento $\tau = 1480$ Kgf.

As peças de acoplamento dos mastros foram afixadas ao guarda corpo com ancoragem, com o auxílio de uma gaiola, construída especificamente para esse fim, figura 5.32.

Após a instalação desses acoplamentos, os mastros foram transportados com caminhão até o local e fixados, finalmente, à estrutura. Figuras 5.33 e 5.34

FIGURA 5.32: FURAÇÃO DA ESTRUTURA PARA ACOPLAMENTO.

FIGURA 5.33: MOMENTO DO ACOPLAMENTO E MASTRO ACOPLADO.

FIGURA 5.34: VISTA DE 2 MASTROS INSTALADOS NO VA-19, COM ANTENAS POSICIONADAS.

Conforme o estudo desenvolvido pelo Professor Dr. Mazzilli os mastros, acoplados à estrutura, deverão apresentar as seguintes componentes para o deslocamento d projetado num plano que contém a vertical e o eixo longitudinal da estrutura:

translação q_1 ao longo do eixo longitudinal da estrutura e
translação q_2 ao longo da vertical.

Ao ponto na estrutura, após o deslocamento d , deverão corresponder as seguintes componentes:

componente de translação u ao longo do eixo da estrutura;
componente de translação ω ao longo da vertical e
componente angular φ devido à rotação.

Se o mastro for rígido a relação entre o centro de fase da antena no topo do mastro e o ponto no viaduto, com respeito à vertical, será dada por:

$$h + \omega = q_2 + h \cdot \cos \varphi \quad 5.1$$

Se φ for um ângulo pequeno, uma vez que se espera uma flecha máxima de 0,04 m no centro da viga, o que acarreta $\cos \varphi$ próximo à unidade, pode-se adotar a simplificação:

$$q_2 + h \cdot \cos \varphi \cong q_2 + h \quad 5.2$$

Então, conforme o primeiro membro de [5.1]:

$$\omega \cong q_2$$

5.3

já com relação ao eixo da estrutura:

$$q_1 = u + h \cdot \sin \varphi \quad 5.4$$

pela mesma razão acima, $\sin \varphi$ resulta em um valor pequeno, e pequeno será o valor $h \cdot \sin \varphi$, portanto $q_1 \cong u$ e a coordenada u poderá ser expressa por:

$$u \cong q_1 \quad 5.5$$

conforme pode ser observado na figura 5.35.

Se o mastro for flexível, a [5.5] precisaria ser corrigida para levar em conta a

flecha elástica do mastro e a expressão $h \cdot \sin\varphi$ não pode ser desconsiderada.

5.3.4 Calibração da rede geodésica de referência

A fase de observações teve início após a construção dos pilares da rede geodésica de referência e instalação dos mastros. As primeiras observações de campo foram realizadas em 28 de Novembro de 2001, seguindo-se de campanhas sucessivas no dia 7 e 14 de Dezembro. Com receptores da própria Universidade e também aqueles cedidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, todos de dupla frequência, com antenas “Choke Ring”, as observações dos pilares foram realizadas em horários diversos, com sessões de 1^h:30^m a 3^h de duração procurando-se assim realizar observações com qualidade necessária.

O cálculo das sessões e o ajuste das observações foram realizados no programa Trimble Geomatics Office. Os resultados obtidos no ajustamento vetorial e as coordenadas no *datum* WGS 84 dos pilares da rede geodésica de referência são apresentados nas tabelas 5.2 a 5.5 e figuras 5.36 a 5.38. Os erros obtidos e dispostos na tabela 5.4 em azul são considerados adequados e possuem nível de confiança $\alpha=95\%$. Para detalhamento dos termos apresentados nestas tabelas recomenda-se consulta a TRIMBLE NAVIGATION (2001)

TABELA 5.2:
ESTATÍSTICA GLOBAL.

Fator de referência da rede	:	0,98
Teste Chi Quadrado ($\alpha=95\%$)	:	Aceito
Graus de liberdade	:	9,00

TABELA 5.3:
ESTATÍSTICA DAS
OBSERVAÇÕES.

Fator de referência	:	0,98
Número de redundância (r)	:	9,00

TABELA 5.4: COORDENADAS GEODÉSICAS AJUSTADAS.

Nome do Ponto	Latitude φ	Erro em φ	Longitude λ	Erro em λ	Altitude Geométrica h	Erro em h	Injunção
ECO4	23°53'58,61123"S	0,0031m	46°28'27,29216"W	0,0033m	110,7482m	0,0106m	
ECO2	23°53'43,67500"S	0,0015m	46°33'55,31929"W	0,0014m	750,2013m	0,0041m	
ECO3	23°52'05,99673"S	0,0016m	46°30'10,59422"W	0,0015m	761,0900m	0,0046m	
PI01	23°33'03,05757"S	0,0000m	46°43'53,65510"W	0,0000m	718,2029m	0,0000m	φ, λ, h

TABELA 5.5: COVARIÂNCIAS.

Do Pontot	Para o Ponto	Componentes	Erro <i>a-posteriori</i> (1,96 σ)	Precisão Horiz. (PPM)	Precisão 3D (razão)
ECO4	ECO2	Az. 272°49'00,2936"	0°00'00,0632"	0.331538	1:3016249
		Ht. 639,4531m	0,0101m		
		Dist. 9.290,1814m	0,0031m		
ECO4	ECO3	Az. 319°50'49,8485"	0°00'00,1575"	0.727458	1:1374650
		Ht. 650,3418m	0,0111m		
		Dist. 4.532,5721m	0,0033m		
ECO2	ECO3	Az. 64°42'46,4406"	0°00'00,0600"	0.275863	1:3624993
		Ht. 10,8887m	0,0060m		
		Dist. 7.031,9735m	0,0019m		
ECO2	PI01	Az. 336°01'26,0007"	0°00'00,0068"	0.035388	1:28258365
		Ht. -31,9984m	0,0041m		
		Dist. 41.761,1121m	0,0015m		
ECO3	PI01	Az. 326°24'24,5256"	0°00'00,0072"	0.037555	1:26627668
		Ht. -42,8871m	0,0046m		
		Dist. 42.190,0573m	0,0016m		

5.3.5 Ensaios no VA-19, realizados entre 08 e 11-01-2002

Realizadas as atividades de campo para a calibração do sistema de referência, mesmo sem o cálculo definitivo, foi dado prosseguimento à fase experimental subsequente, que correspondeu às observações com antenas dos receptores em estação sobre os mastros durante a passagem de veículos pesados. Nesta vez foram empregados receptores NOVATEL OEM3 e OEM4, com dupla frequência e capacidade para registrar épocas a taxa de 10 e 20 Hertz., fornecidos pela Universidade de Calgary no Canadá e pela empresa BASE Aerofotogrametria e Projetos S/A, figura 5.39.

FIGURA. 5.39: INSTALAÇÃO DA ANTENA NO MASTRO.

As observações foram realizadas durante de 08 a 11 de janeiro de 2002, principiando após as 2:58 horas (TGPS) 8 e terminando 00: 34 do dia 11. Foram realizadas 5 sessões, contemplando períodos em que a estrutura estava em repouso e com carga dinâmica.

Em relação à carga dinâmica houve dois experimentos distintos: a passagem de cargas especiais e o trânsito normal da rodovia em períodos de pico, com trânsito de caminhões oriundos do porto de Santos. A maior carga especial pesando em torno de 350 t prevista, não passou no local do experimento, pois, houve falha no sistema do veículo e este parou cerca de 0,5 quilômetro antes do VA-19.

Observa-se que durante o período em que se permaneceu sobre o viaduto, experimentavam-se sensações de oscilações verticais acentuadas na estrutura, causadas em boa parte pela velocidade dos veículos. Estas sensações se confirmaram mais tarde, por ocasião do segundo experimento, serem decorrentes dos efeitos das acelerações apresentadas pela estrutura sobre o corpo humano.

Os arquivos gerados por essas sessões, as quais tiveram duração entre 1 a 2 horas, com taxa de rastreamento de 10 ou de 20 Hz, foram gravados diretamente do receptor para o computador acoplado. Em seguida os arquivos foram transformados para o formato RINEX. Um arquivo, nesse formato, chega a ter 68 Mb de dados.

5.3.5.1 Processamento

O processamento dos dados desta primeira campanha não pôde ser realizado no Laboratório de Topografia e Geodésia devido à dificuldade havida em adquirir-se um programa com a capacidade de processá-los. Os dados foram enviados a Calgary, aos cuidados do professor Dr. Gerard Lachapelle, para processamento no programa Flykin e para a UNESP de Presidente Prudente SP, aos cuidados do professor Dr. João Francisco Galera Mônico para processamento em um programa em desenvolvimento.

Os resultados obtidos pelo processamento com o Flykin embora tenham atingido a solução de ambigüidades, se comprovaram com acentuada ocorrência de perda de ciclos e apresentaram resultados com ruídos acima do normal, muito provavelmente devido a efeitos da ionosfera. Este processamento originou o relatório *Processing of Régis Bueno's Data in Flykin+*, anexo A.

Os resultados obtidos pelo Professor Dr. Galera demonstraram problemas semelhantes apresentando ruídos igualmente incompatíveis com a precisão necessária.

No mês de maio de 2002, ainda sem o programa adequado obteve-se por empréstimo uma cópia do programa Ashtech Solutions v. 2.5, cedido pela empresa Alezi Teodoline. Este programa tem a capacidade de processar dados observados com frequência de 20 Hz. Com esta versão foram realizados processamentos preliminares dos dias 08 e 09 os quais são apresentados a seguir através de gráficos.

Neste processamento pretendeu-se avaliar as dificuldades e as soluções possíveis nos dados do experimento, principalmente em termos de qualidade dos mesmos, já que em outros trabalhos realizados na região, verifica-se acentuada ocorrência de dados com elevado nível de ruídos e perdas de ciclo.

O programa empregado não está habilitado para processamento de dupla frequência, acarretando perda de informação e conseqüentemente uma solução menos adequada ainda ao problema, pois, por exemplo, deixa-se de obter a solução de ambigüidades OTF que seria a mais adequada neste momento.

No dia 08 produziram-se soluções fixas em boa parte dos vetores, que somam 11979 determinações. No dia 09 isso já não ocorreu e somente alguns poucos vetores obtiveram a solução fixa para um total de 28405 determinações.

Os resultados obtidos demonstram a dependência em relação à quantidade de satélites observados. Quando a quantidade é superior a 6 os desvios tendem a se aproximar do valor obtido na solução estática, denominada M2RF, calculada para o mastro 2 no dia 08.

A limitação devida ao programa empregado produziu soluções inadequadas ao objetivo do experimento, mas permite inferir que sob determinadas condições pode ser possível obter um posicionamento mais preciso.

O processamento demonstra também que houve perdas de ciclo em quantidade maior do que o esperado, conforme se pode observar nos exemplos dos gráficos das figuras 5.40 e 5.41. O primeiro demonstra saltos da ordem de decímetros nas diferenças de coordenadas cartesianas D_x , D_y e D_z . O segundo mostra a variação do número de satélites que em um período de aproximadamente 4 minutos permaneceu com 4 veículos espaciais disponíveis.

Concluiu-se que os resultados obtidos foram prejudicados por efeitos da ionosfera, que, conforme o gráfico da figura 5.42, estava em uma época de alta atividade.

5.3.6 Ensaio no VA-19 realizados em 23-09-2004

Após a constatação de que as observações realizadas no VA-19 em 2002 foram prejudicadas pela forte atividade ionosférica, bem como pelo problema havido com o veículo da carga especial, concluiu-se pela programação de um novo experimento. O objetivo seria de verificar a possibilidade de determinar os deslocamentos e a frequência de vibração da estrutura sob as condições de carga especial e com as normais de tráfego, posto que o viaduto aparentasse possuir movimentos verticais suficientes para serem detectados também na segunda condição.

Neste experimento pode-se contar com a colaboração do Laboratório de Estruturas e Materiais da EPUSP e com a empresa Laboratório de Sistemas Estruturais LSE, os quais proporcionaram o monitoramento dinâmico com extensômetros e servo-acelerômetros.

A quantidade de receptores GPS foi complementada pela empresa Santiago e Cintra, fornecidos pelo período único de uma semana, sob a licença da Topcon

Positioning Systems, pois o LTG possuía somente dois receptores capazes de adquirir dados com frequência de 20 Hz. Aquela empresa forneceu 4 receptores Topcon Hipper, com características similares aos Javad Legacy, pois são projetados pela Javad Positioning Systems. Entretanto, possuíam uma qualidade levemente inferior por não possuírem antenas tipo choke ring.

Após algumas tentativas o novo experimento pôde ser realizado em 23-09-2003. Entretanto, não foi possível fazê-lo sob a passagem da carga especial, porque esta foi adiada para a semana seguinte, quando não se tinha mais reunidas as condições necessárias à realização do experimento.

5.3.6.1 Análise dos resultados

Teve o monitoramento dinâmico, com os servo-acelerômetros e os extensômetros, o objetivo de determinar as frequências do primeiro modo de vibração de um ponto do tabuleiro sob o mastro e deste, propriamente dito, para posterior comparação com os valores que viessem a ser determinados pelas posições derivadas do GPS.

Foram instaladas rosetas com acelerômetros no topo do mastro 1, localizado no ponto médio do lado direito da estrutura, e no tabuleiro junto a este mastro. Ao longo deste último instalaram-se duas seções ao longo do mastro, compostas por quatro extensômetros diametralmente opostos, uma próxima ao acoplamento distante 5,4 m do topo e outra na distância de 2,4 m deste, vide figura 5.43.

As frequências verificadas pelos acelerômetros (1, 2, 3), dispostos em roseta, no topo do mastro 1 (MST-1) e no pavimento (4, 5, 6) junto àquele, são mostradas na figura 5.43 e 5.44. Os dados foram processados pelo *LSE* com o programa Aqdados; os valores obtidos para o primeiro modo de vibração são:

- no topo, tanto na direção longitudinal quanto na transversal, foram determinados valores com 4,95 Hz e na direção vertical 3,29 Hz;
- no pavimento, na direção longitudinal foi determinado o valor de 3,29 Hz, na transversal predomina 0,6 Hz e na direção vertical o valor de 3,29 Hz.

FIGURA 5.43: POSICIONAMENTO DOS ACELERÔMETROS E EXTENSÔMETROS.

FIGURA 5.44: ESPECTROS DE FREQUÊNCIAS DETERMINADOS PELOS DADOS DOS ACELERÔMETROS NO TOPO DO MASTRO E NO PAVIMENTO.

Fonte: Adaptado de LSE, 2005 (informação pessoal).

Observa-se que na figura 5.44 os valores das ordenadas são dados em termos de desvio médio quadrático da aceleração por frequência (Hz), significando a letra *m* valores em milésimos de *g* e μ milionésimos desta grandeza.

As observações com o sistema GPS se processaram no período de 15^h 06^m a 18^h e 30^m em Tempo GPS, conforme mostrado no gráfico da figura 5.45. As figuras 5.46 e 5.47 mostram os gráficos de geometria satélite-receptor para a posição do mastro 1.

Nova dificuldade se apresentou no momento do processamento, pois, o programa Pinnacle não está autorizado a processar dados dos receptores Hiper, em condição de receptor base, não os aceitando nem mesmo no formato RINEX, bem como nas tentativas de substituir os cabeçalhos dos arquivos.

FIGURA 5.45: GRÁFICO DE OCUPAÇÃO E RECEPTORES NO DIA 23/09/2004.

Os dados foram processados em Presidente Prudente – SP na UNESP, curso de engenharia Cartográfica, com a colaboração do Professor Dr. João Francisco Mônico Galera, no programa GPS Adjustment Software GAS v.2.21, versão

adaptada pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista FCT-UNESP.

Foram processados os dados relativos à ECO 4 - MST 1, calculados com L1 e L2, das 16:13:20 às 16:30:22, e transformados para diferenças de coordenadas locais (Dn, De e Dh) com o programa xyz2neh.exe a partir de uma época inicial, previamente determinada. Verifica-se que durante a sessão foram observados 7 satélites, com GDOP entre 0,77 e 0,83. Ambos os processamentos indicam diversas perdas de ciclo no decorrer do período.

Do conjunto processado, os resultados L2 demonstraram serem menos dispersos. A tabela 5.6 dispõe a estatística dos desvios de 9534 épocas em relação à coordenada inicial.

TAB. 5.6: ESTATISTICA DA SOLUÇÃO OKIN L2,
PARA ECO4 – MST1.

Estat.	De	Dn	Dh
Media	0,002881 m	-0,00028 m	0,002866 m
Sigma	0,002581 m	0,00301 m	0,008064 m

Observando-se que as frequências na direção transversal e longitudinal do mastro 1 são iguais (vide figura 5.43), foram analisadas as séries temporais de De e Dn diretamente sem transformações pois estas direções diferem apenas 6° 48' em relação a direção transversal e longitudinal do tabuleiro.

As 9534 épocas foram separadas em três amostras: *a*, *b* e *c* com 1024 épocas que importadas para o Matlab passaram pela mesma metodologia descrita no experimento do shaker. Os resultados obtidos para a amostra *a*, nos três eixos *n*, *e* e *h*, são apresentados nas figuras 5.48 a 5.53 a seguir.

Chama-se, mais uma vez, a atenção do leitor para que observe que nos gráficos de sinais a unidade do eixo de abscissas é a época, equiespaçadas de 0,05

segundos e no de ordenadas é o metro. Nos gráficos de função de densidade espectral (PSD) as unidades da abscissa e da ordenada é Hz e m^2/Hz , respectivamente.

FIGURA 5.50: MASTRO 1, DADOS L2, SINAL DOS DESVIOS EM NORTE RELATIVOS A UMA ÉPOCA INICIAL, APÓS FILTRAGEM.

FIGURA 5.51: MASTRO 1, DADOS L2, ESPECTRO DO SINAL DOS DESVIOS EM NORTE APÓS FILTRAGEM.

FIGURA 5.52: MASTRO 1, DADOS L2, SINAL DOS DESVIOS EM ALTURA GEOMÉTRICA RELATIVA A UMA ÉPOCA INICIAL, APÓS FILTRAGEM

FIGURA 5.53: MASTRO 1, DADOS L2, ESPECTRO DO SINAL EM ALTURA GEOMÉTRICA, APÓS FILTRAGEM.

Nas demais séries investigadas os resultados tendem a se repetir e não serão aqui apresentados. A tabela 5.7 traz um resumo dos resultados. Os valores dos deslocamentos médios foram obtidos através das séries dos sinais filtrados, usando-se o cursor para medir um valor médio mínimo e outro máximo, determinados de forma visual. O deslocamento foi obtido pela média da diferença entre aqueles dois valores, somada ao valor médio mínimo.

TABELA 5.7: RESULTADOS OBTIDOS COM PROCESSAMENTO L2 NO VIADUTO VA-19.

Amostra	F (Hz)	Deslocamento (m)	Observações
<i>a</i>			
De	4,92	0,0014	
Dn	4,92	0,0018	
Dh	3,30	0,0042	Existem outros picos predominantes no espectro.
<i>b</i>			
De	4,96	0,0011	Existem picos menores a 4,92 e 4,96 Hz.
Dn	4,84	0,0012	
Dh	3,33	0,0040	Espectro com baixa potencia, existem outros picos com magnitude semelhante.
<i>c</i>			
De	4,96	0,0016	
Dn	4,86	0,0018	Existem outros dois com menor magnitude a 4,90 e 4,96 Hz.
Dh	3,24	0,0039	Outro com magnitude similar a 3,06 Hz.

Comparando os valores da tabela 5.7 verifica-se que existe proximidade entre as médias dos deslocamentos em cada eixo, até mesmo no caso da altitude geométrica que apresentou maior variação no espectro e ambigüidade nos casos *b* e *c*. O valor em *h* está coerente com aquele observado *in loco* em 08-08-05 com uso de um teodolito estacionado na estrada de serviço e colimado na borda inferior de um orifício, com 1 cm de diâmetro, no mastro 1. As oscilações, com o tráfego da rodovia observadas da borda, pouco excederam a metade do diâmetro do orifício.

Comparativamente aos valores de D_h testados com L1, os resultantes de L2 são mais promissores, pois naquele primeiro há maior ambigüidade nas respostas em frequência e os deslocamentos médios são de 0,002 m, vide figura 5.54.

Chama-se a atenção para se verificar nos gráficos de diferença de altitude tanto de L1 quanto de L2 a ocorrência de energias na banda de 2, a 3 Hz como nos gráficos de aceleração.

A seguir são apresentadas duas séries de gráficos resultantes da transformada de ondaleta realizada com o programa de A. GRINSTED et al. (2004); com modificações realizadas por Barbosa (informação verbal). Foram analisadas séries temporais resultantes dos ensaios no shaker e no VA 19, com e sem uso de filtro, obtendo-se os respectivos espectros de potência de ondaletas (WPS). As análises foram realizadas pela interpretação dos gráficos, nos quais o eixo x refere-se à escala temporal em segundos (intervalos de 0,05 s) e no eixo y estão dispostas as frequências em Hz.

A linha preta contínua, na parte inferior e nas laterais do gráfico, delimita o cone de influência, as frequências fora desse cone devem ser negligenciadas por não possuírem confiança estatística. O contorno em preto de áreas no WPS indica que a região interna apresenta 95% do nível de confiança, assumindo o ruído vermelho de fundo, definido pela variância e o número de pontos da série temporal original.

Os gráficos precedentes aos WPS mostram o sinal ao qual se aplicou a transformada de ondaleta, sendo o eixo x o do tempo em segundos e o y o dos desvios dos deslocamentos em metros.

Em primeiro lugar apresenta-se a nas três páginas a seguir os gráficos da série correspondente ao ensaio com o shaker, conforme explanado anteriormente, operando em 4 Hz somente. Os sinais analisados correspondem às séries determinadas com o TD e o GPS, este último sem e com o uso de filtro. Os demais sinais em 1 e 2 Hz, não foram analisados com ondaletas.

Observa-se no espectro da figura 5.55 o sinal correspondente ao transdutor de deslocamento, sem uso de filtragem. Verifica-se uma faixa de energia, dentro do limite de confiança, paralela ao eixo do tempo, demonstrando que há predomínio de vibração na frequência de 4 Hz. Verifica-se também que há ocorrência de energia em frequências menores de que 4 Hz. A transformada em ondaleta mostra que estas

freqüências mais baixas não são contínuas no tempo e possuem maior nível de energia. Elas correspondem aos movimentos exemplificados no detalhe na figura 5.19 e às freqüências menores do espectro da figura 5.20, onde se observa também que, na FFT, contrariamente à ondaleta, esta banda entre 1 e 2 Hz demonstra menor energia que 4 Hz.

No gráfico da figura 5.56 está disposta a série correspondente aos ensaios anteriores, que simultaneamente foi determinada com GPS. Apenas em dois trechos, no início (até 20 segundos) e outro após 65 segundos, ocorrem energias em 4 Hz, por períodos muito curtos. Esta série após a mesma filtragem (passa alta) já descrita anteriormente, evidencia uma pequena melhora, vide figura 5.57, mas também não se pode concluir, afirmando, que o GPS foi capaz de detectar os movimentos e as freqüências neste caso, pois, se assim o fosse deveria haver, igualmente ao gráfico da figura 5.55, uma faixa contínua em 4 Hz. Com a transformada em ondaleta confirma-se a conclusão obtida para o gráfico da figura 5.25: o GPS no método cinemático, neste caso, não foi capaz de detectar os desvios.

Nas seis figuras seguintes estão dispostos os gráficos dos sinais e respectivas transformadas em ondaleta, referentes ao experimento do viaduto VA-19. Os dados são concernentes às determinações com GPS no mastro 1 sob ação do tráfego da rodovia, usando-se a amostra *a*, processada em L1 e L2.

A figura 6.58 apresenta o resultado em L1 para D_h , sem uso de filtro, onde verifica-se que aproximadamente entre as épocas de 11 segundos e 24 segundos, acima do cone de influência, predomina maior nível de energia nas frequências abaixo de 0,12 Hz podendo-se creditá-las ao multicaminhamento. Regiões nas proximidades da banda de 0,5 Hz também apresentam maior energia, mas sem confiabilidade de 95% e provavelmente possuem a mesma origem. Na banda acima de 4 Hz, o gráfico de WPS apresenta regiões com maior confiabilidade, que podem ser observadas na ampliação mostrada na figura 5.59. Apenas após filtragem passa alta - WPS mostrada na figura 5.60 - é possível distinguir melhor as energias presentes nesta faixa onde se verifica o predomínio de vibrações na região de 2 até 4 Hz. Nota-se que, as estruturas apresentadas no gráfico variam em certa banda de frequências por um curto intervalo de tempo, sendo estas, por vezes largas na faixa próxima a 3,3 Hz nos últimos 15 segundos. Estas vibrações de 3,3 Hz são coincidentes com as informações do acelerômetro A3, mas, demonstram que há variabilidade temporal o que pode ser explicado devido ao intervalo entre a passagem de veículos que causam excitação na estrutura e no mastro. Também se observam energias na faixa pouco acima de 2 Hz, as quais podem estar associadas ao tráfego de veículos.

Fica evidente com este último gráfico que, nestes casos, há necessidade de uso de filtro, mesmo considerando-se a transformada em ondaletas um filtro passa banda.

Nas figuras 5.61 a 5.63 estão apresentados os gráficos de WPS relativos ao processamento com L2. No primeiro, correspondente a De se identificam feições nas frequências de 4,9 Hz, no intervalo de 5 a 10 segundos e na banda de 3 a 5 Hz no intervalo de 40 a 50 segundos, observando também vibrações em 2 Hz aos 14 segundos aproximadamente. Nota-se que, à semelhança do gráfico na figura 5.60, ocorrem feições em U, vinculando as regiões de maior energia, dando indícios de

transferência desta, que talvez possa ser explicada pelas respostas variáveis do mastro à excitação do tráfego. Nos demais gráficos para Dn e Dh também se identificam regiões com as frequências medidas com os acelerômetros e com o GPS pela FFT, bem como os respectivos intervalos de tempo em que ocorrem apresentando-se novamente as feições em U. Os três gráficos mostram energias no período de 37 a 50 segundos condizentes com os respectivos acelerômetros. No gráfico da figura 5.61 ocorrem zonas de energia a 4,9 Hz entre 5 e 10 segundos, diferentemente dos gráficos seguintes em Dn e Dh que, além das já descritas para 37 a 50 segundos, apresentam áreas com maior nível de energia centradas em 3 Hz (Dn e Dh) e 2 Hz (Dh) no intervalo entre 15 e 24 segundos.

Lembrando que a direção Este corresponde ao sentido longitudinal do tabuleiro e à direção dos acelerômetros 1 e 4 e ainda, que se está dispondo a frequência no tempo, observa-se que a ocorrência de resposta do mastro nesta direção, antes das demais, pode estar associada ao um impacto inicial da carga (caminhão) ao entrar no tabuleiro do VA 19.

Em seguida a este comportamento entre 15 e 27 segundos, ocorrem respostas em Dn e Dh (transversal e altitude geodésica) na banda de 2 a 4 Hz, estes comportamentos podem ser observados também nos acelerômetros 2 e 5 (Dn) e 3 e 6 (dh).

As três figuras subseqüentes mostram os gráficos relativos às séries da amostra a (De, Dn e Dh) calculadas pelo LSE utilizando o programa Aqdados. As series originais foram tratadas com filtro passa-alta 2,022 Hz. No cálculo dos espectros utilizou-se a FFT com janelamento de Hanning, devido à natureza transiente do sinal.

Analisando os resultados obtidos neste processamento pode-se observar que os principais picos de energia apresentam coerência com aqueles demonstrados nas demais análises da mesma amostra, vindo a corroborar com seus resultados.

FIG. 5.65: ESPECTRO DE POTÊNCIA COM JANELAMENTO DE HANNING, PARA O SINAL D_n , RESULTANTE DE L2, NO MASTRO 1, COM USO DE FILTRO PASSA ALTA. LSE, 2007 (informação pessoal).

FIG. 5.66: ESPECTRO DE POTÊNCIA COM JANELAMENTO DE HANNING, PARA O SINAL D_h , RESULTANTE DE L2, NO MASTRO 1, COM USO DE FILTRO PASSA ALTA. LSE, 2007 (informação pessoal).

Na figura 5.67 se demonstra a frequência determinada nestes ensaios juntamente com os ensaios realizados por PENNER (2001), onde se verifica que os valores determinados pelo GPS estão dentro da faixa de valores esperados para pontes com este vão conforme aquele autor.

Na tabela 5.8 e figura 5.68 e 5.69 são apresentados os resultados da modelagem por elementos finitos do tabuleiro e vigas Gerber, com seus apoios, gentilmente realizada para esta pesquisa e fornecida pelo Laboratório de Sistema Estruturais *LSE*, objetivando comparação com os dados resultantes do ensaio por GPS. Na tabela verificam-se as frequências de doze modos de vibração da estrutura.

Embora não seja um modelo geométrico muito preciso, fornece informações importantes para complementar a análise dos resultados obtidos por GPS. Observa-se que o modelo espacial apresenta os 1º e 2º modos com respectivamente 3,11 Hz e 3,38 Hz. Verifica-se que a deformada modal é transversal e longitudinal

respectivamente para o primeiro e segundo modo. As respostas obtidas pelo modelo numérico reafirmam aquelas obtidas pelo GPS.

Os picos próximos de 2 Hz estão associados aos modos globais (transversal e longitudinal) e os demais picos obtidos após as frequências do primeiro e segundo modo, associadas à excitação causada pelo tráfego, ALMEIDA (informação verbal). Deve-se ressaltar que os veículos que normalmente trafegam pelas rodovias brasileiras tendem a excitar as estruturas na faixa de 1 a 3 Hz podendo chegar até a 6 Hz, ALMEIDA e RODRIGUES (informação verbal).

Finalmente, observa-se que para atingir uma interpretação mais profunda das respostas apresentadas nos gráficos produzidos é preciso ampliar os estudos sobre estruturas contanto inclusive com a assessoria de especialistas no assunto. Espera-se que da análise mais ampla destes resultados possam resultar maior nível de informação sobre o comportamento da estrutura ensaiada.

TABELA 5.8: MODOS DE VIBRAÇÃO DO VA-19.

FONTE: LSE, 2007 (informação pessoal).

Modo de vibração		Período	Frequência natural
		seg.	Hz
Modo	1	0,32	3,11
Modo	2	0,30	3,38
Modo	3	0,24	4,16
Modo	4	0,19	5,13
Modo	5	0,18	5,46
Modo	6	0,18	5,61
Modo	7	0,17	5,95
Modo	8	0,17	6,01
Modo	9	0,15	6,65
Modo	10	0,15	6,71
Modo	11	0,14	7,10
Modo	12	0,13	7,75

5.4 Proposta básica de metodologia para a monitoração de estrutura com carga dinâmica pela utilização de GNSS

Conforme descrito na introdução deste capítulo a proposta ora apresentada é resultante de pesquisas realizadas, experiência profissional do autor e os resultados obtidos nos ensaios conduzidos.

O objetivo desta proposta básica é dar aos pesquisadores e profissionais atuantes nesta área um roteiro básico de metodologia que deverá ainda ser aperfeiçoada com pesquisas específicas para as condições ambientais e das estruturas brasileiras. Assim, apresenta-se a seguir uma Proposta Básica de Metodologia para a Monitoração de Estrutura com Carga Dinâmica com a utilização de GNSS:

- Planejamento do projeto de monitoração, envolvendo o conhecimento do problema e levantamento de informações básicas para o mesmo, tais como: os pontos a monitorar e a magnitude esperada para os deslocamentos e frequência natural (vide fluxograma geral de atividades fig 4.1);
- Emprego preferencial de receptores do tipo GNSS, com dupla frequência, antena choke ring, algoritmo de processamento de sinais para minorar multicaminhamento, sistema anti-interferência, grande capacidade de armazenamento de dados ou armazenamento direto em computador enquanto opera e alta frequência de aquisição de dados (acima de 20 Hz) sendo ajustados para uma taxa de aquisição de dados variável com o tipo de estrutura, compreendida entre 2 a 10 vezes a maior frequência da banda de interesse;
- Elaboração e execução do projeto das redes geodésicas, conforme metodologia apresentada no capítulo 4, inclusive com a calibração dos efeitos de multicaminhamento na estação, bem como determinação das coordenadas dos respectivos pontos a serem monitorados.
- Realização de observações com a estrutura inicialmente em repouso, em seguida sob excitação e finalizando, em repouso, adquirindo dados

continuamente e sob adequadas condições de geometria satélite-receptor, bem como em períodos com menor atividade ionosférica;

- Processamento dos dados observados pelos receptores sob cuidadosa análise de parâmetros e soluções objetivando atingir a maior precisão necessária;
- Transformação das coordenadas resultantes para um sistema adequado à geometria da estrutura de forma que as investigações possam ser realizadas nas direções de interesse;
- Obtenção dos desvios relativos a um valor médio das mesmas ou a uma posição de referência obtida com a estrutura em repouso;
- Análise dos resíduos por processos adequados de análise modal;

Esta metodologia apresenta a característica de proporcionar um referencial único para qualquer campanha de observações em épocas diversas o que normalmente não se verifica com instrumentos não geodésicos utilizados na análise dinâmica.

Em casos onde se faz ensaios sob uso de veículos de prova ou de cargas especiais esta metodologia pode proporcionar a posição espacial antes, durante e a posteriori da passagem do veículo ou da carga.

As coordenadas dos pontos monitorados na estrutura através desta metodologia podem ser determinadas antes da passagem da carga, portanto, sem os efeitos dos esforços aplicados, durante a passagem, conhecendo-se as frequências e as amplitudes e consequentemente os respectivos deslocamentos e as coordenadas finais desses pontos após cessarem os esforços.

6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

As conclusões apresentadas foram concebidas e executadas em um projeto para monitoração de um viaduto, construído em vigas Gerber, com vão de 35 m, caracterizado por uma estrutura rígida e com frequência natural maior que aquelas normalmente apresentadas na literatura sobre monitoração por GPS.

- De forma a se manter referência a pontos externos e independentes do comportamento da estrutura, bem como objetivando a melhor qualidade dos sinais observados, implantou-se uma rede geodésica de referência, adequada ao projeto e uma rede de alvos de monitoração na estrutura de forma a acompanhar os possíveis movimentos dos pontos observados.
- Esta rede geodésica deve ser tomada como infra-estrutura básica para se determinar as coordenadas dos pontos observados, bem como formas alternativas de FRF's.
- Nos ensaios na base USP com uso de um shaker oscilando a frequências e deslocamentos conhecidos, tratados com uma metodologia de filtragem para remover as informações indesejáveis, detectou-se as frequências de oscilação do shaker e os deslocamentos da antena, confirmando com aqueles obtidos pelo transdutor de deslocamento nos casos de 1Hz e 2 Hz. A mesma metodologia de tratamento de dados foi aplicada ao ensaio do viaduto VA-19.
- No VA-19 verificou-se conforme mostrado no capítulo 5 que o GPS possui sensibilidade também à excitação do tráfego normal.
- Conforme ainda se verifica no capítulo 5 tabela 5.7 as observações de acelerômetros, determinando as frequências naturais dos mastros e do tabuleiro, confirmam os resultados do posicionamento obtido por GPS, em planimetria.

- Os resultados no segundo ensaio do viaduto demonstraram também a viabilidade do posicionamento relativo cinemático por GPS na monitoração de estruturas deste tipo. As frequências foram confirmadas pelos acelerômetros e análise dos elementos finitos aplicados e os deslocamentos, no caso vertical, por observações com estação total.
- O primeiro ensaio no viaduto demonstra o impacto dos efeitos atmosféricos em consequência do ciclo solar de 11 anos, apresentando um alerta para o limite da tecnologia GPS nestas condições.
- Confirma-se mais uma vez que o multicaminhamento é um dos erros a serem removidos das observações pois afetam parte das informações embora se possa valer de recursos como a filtragem em casos que as frequências estão acima daquelas provocadas por esta fonte de erro;
- Com esta pesquisa foi possível desenvolver uma proposta básica de metodologia de monitoração geodésica para estruturas, com a qual se pode determinar os deslocamentos em uma série temporal, a partir de um referencial único para qualquer época de observação.
- A transformada em ondaleta demonstrou maior capacidade de interpretação dos fenômenos do que a transformada de Fourier ou a transformada de Fourier janelada.

6.2 Recomendações

Considerando que os ensaios realizados no viaduto VA-19 já dispõe de uma rede geodésica de referência e os mastros ainda permanecem no local de forma adequada, podem ser realizados outros ensaios, pois os resultados obtidos, embora bastante promissores, requerem ainda pesquisas mais abrangentes, de forma a aprimorar as observações e proporcionar maior nível de informação. Portanto, recomendam-se as seguintes pesquisas:

- Realizar ensaios sob condições de efeito atmosférico mínimo, que normalmente ocorrem nos meses de junho e julho;

- Realizar ensaios sob a passagem de veículos com cargas especiais e instrumentados com GPS geodésico, estabelecendo um referencial único nas quatro dimensões (X, Y, Z e T) também para fonte de excitação e demais instrumentos;
- Realizar a calibração dos efeitos de multicaminhamento nas estações da rede de referência e da rede de alvos;
- Pesquisar sobre a possibilidade de remoção de multicaminhamento através da transformada em ondaletas, sem causar a remoção das respostas da estrutura às excitações;
- Pesquisar sobre a automatização dos processos de aquisição, processamento e tratamento de dados objetivando o monitoramento de estruturas por períodos prolongados;
- Ampliar as pesquisas sobre o emprego de métodos de tratamento estatístico dos sinais, diferentes formas de filtragem de dados e o tratamento com transformada em ondaletas, objetivando ampliar a confiabilidade e a melhor análise dos resultados;
- Pesquisar a integração com outros instrumentos, tais como acelerômetros e termômetros, com o GPS, proporcionando que as análises dos resultados de diversos instrumentos de monitoração se dêem na mesma base espacial e ou temporal;
- Realizar ensaios com receptores GNSS e com maior frequência de aquisição de dados.

Anexo A

PROCESSING OF RÉGIS BUENO'S DATA IN FLYKIN+

Prepared for

**Satellite-Based Positioning and Navigation Group
Department of Geomatics Engineering
The University of Calgary
2500 University Drive N.W.
Calgary, Alberta
T2N 1N4**

by

Lance de Groot

Dec 5, 2002

TABLE OF CONTENTS

1 – INTRODUCTION	201
2 – DATA QUALITY	201
2.1 - IONOSPHERE.....	201
2.2 – DATA GAPS	203
3 – PROCESSING STRATEGY	204
4 – RESULTS	204
5 – CONCLUSIONS.....	207

1 – INTRODUCTION

This document describes the use of Flykin+ to process the data collected on the V-19 viaduct of the Rodovia dos Imigrantes for the doctoral thesis of Régis F. Bueno. This document will discuss the problems encountered with the data, the processing strategy used, and some of the results.

2 – DATA QUALITY

2.1 - IONOSPHERE

The main source of difficulty in processing these data was the effect of the ionosphere. The amount of ionospheric bias in these data is extremely high. Figure 2.1 below shows the double difference ionosphere bias estimated by Flykin+ for the Eco2-Eco4 baseline, for the first session on Jan 8. Each colour represents a different double difference.

Figure 2.1: Estimated ionosphere bias for Eco2-Eco4, Jan 8

Shortly after 1:00 local time all ambiguities become fixed, so the ionospheric estimates will be very accurate. We can see that the ionospheric bias gets at least as high as 40 cm, which is over 40 ppm on this 9.3 km baseline. The float ambiguity ionospheric estimates get as large as 100 cm, which is over 100 ppm.

The level of ionosphere is quite high on the other days as well. Ionosphere estimates from static baselines for Jan 9 and 11 are given below in Figures 2.2 and 2.3 respectively. The Eco3-Eco4 baseline shown in Figure 2.3 is approximately half the length of Eco2-Eco4.

Figure 2.2: Estimated ionosphere bias for Eco2-Eco4, Jan 9

Figure 2.3: Estimated ionosphere bias for Eco3-Eco4, Jan 11

Ionospheric effects this large make it extremely difficult to fix L1 or widelane ambiguities directly. Instead it is necessary to use an ionospheric free frequency combination, or to model the ionospheric effect. Modelling the ionosphere will increase the time required to fix ambiguities, as the double difference ionosphere bias must be estimated at the same time as the ambiguities.

2.2 – DATA GAPS

Another problem with the data are the frequent data gaps in some of the files. The data was mostly collected at 10 or 20 Hz, but there is usually only 1-3 seconds of continuous data at a time separated by frequent gaps of several seconds for which no data is available. Figure 2.4 below shows the data gaps for the eco40080.gps file at two different scales.

Figure 2.4: Data gaps in eco40080.gps

The data gaps do not occur in all the files. They seem to be limited to OEM4 files, and only those collected at 10 Hz or greater; mas10080.gps was collected at 2 Hz and does not appear to have any data gaps. There is no loss of lock during the gaps.

These data gaps will increase the time required by Flykin+ to fix ambiguities. When Flykin+ encounters a data gap, the software will predict the station's position during the gap using the last best estimate of the velocity. While the position is being predicted the covariance information for the position and ambiguities will increase. When the data gap ends the

ambiguities will start to converge again, but the covariance values will be greater than when the data gap began. Therefore, during the gaps not only will the ambiguities not converge, but the solution will actually deteriorate somewhat.

3 – PROCESSING STRATEGY

Due to the high ionospheric effects discussed in Section 2.1, Flykin+ was unable to fix L1 or WL ambiguities directly with these data. Even when using the ionospheric free frequency combination, Flykin+ was unable to fix ambiguities reliably.

The processing options that produced best results were to estimate L1 and WL ambiguities and apply a stochastic ionosphere model. This approach uses the L1 and L2 observables, and estimates L1 and WL ambiguities, double difference ionospheric biases for each satellite, and a further ionospheric pseudo-observable. Positions calculated with these options are based on L1 and WL ambiguities. This approach is described as Strategy 8 in the paper “Development and Testing of an Optimal Cascading Scheme to Resolve Multi Frequency Carrier Phase Ambiguities “ by Junjie Liu et al, presented at ION GPS 2002.

This approach was able to fix ambiguities correctly, but on some baselines took a very long time to fix. The length of time required to fix is due in part to the data gaps, and will also be affected by the level of ionospheric bias. Despite the length of time sometimes required to fix ambiguities, this approach produced better results than all others tried.

4 – RESULTS

The fixed baseline Eco2-Eco4 was used to verify the quality of the results obtained from Flykin+ before processing the kinematic stations on the viaduct. A plot of the 3-D position error between the Flykin+ computed position and the known position for Eco4 is given in Figure 4.1 below.

Figure 4.1: Position error for Eco2-Eco4

Once all ambiguities are fixed (green), the solution is very good. The position is good to a few cm in the horizontal, and ~10 cm in height. The height position is poorer than Flykin+ can usually attain on a static baseline, but this may be due to the lack of low elevation satellites, resulting in a poor VDOP (as high as 4.5).

Graphic results for the baselines Eco2-Mas1 and Eco2-Mas2 from Jan 9 are provided below in Figures 4.2 and 4.3 respectively. These are the baselines for which results were given to the University of Calgary, and so are shown for comparison purposes. Raw output from Flykin+ for these and other baselines is attached to this report. For these figures, the position error is referenced to the position computed in the last epoch.

Figure 4.2: Eco2-Mas1 position relative to final epoch

Figure 4.3: Eco2-Mas2 position relative to final epoch

For each baseline, the session shown is that for which the best results could be produced. For some sessions, Flykin+ was either unable to fix ambiguities, or unable to fix correctly.

Because of variability in the ionosphere from session to session, it can be expected that different sessions and different days will have varying levels of success in processing.

5 – CONCLUSIONS

With these data, for most baselines and sessions, Flykin+ is able to consistently and reliably fix ambiguities. The high levels of ionosphere require an ionosphere modeling approach, but do not prevent good results from being obtained with Flykin+.

The quality and reliability of the results could likely be improved if the data did not contain the frequent gaps discussed in section 2.2. It should be noted that some of the best results for a station on the viaduct come from processing the Eco2-Mas2 baseline (see Figure 4.3). Both Eco2 and Mas2 were collected with OEM3s, and do not have data gaps. Better results for other baselines could probably be obtained if the data was continuous.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- ANANGA, N.; SAKURAI, S.; KAWASHIMA, I. Cut slope deformation with GPS. *Survey review*, v. 32, n° 265, jul. 97.
- ANDRADE, J.B. **NAVSTAR – GPS**. Curitiba, 1988. 63p. Apostila – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.
- ARMER, G. S. T. **Monitoring and Assesment of Structures**. London and New York. Spon Press. 2001. 167 p .
- ASHJAEI, J. An analysis of Y-code tracking techniques and associated technologies. **Geodetical Info Magazine**, p.26-30, jul. 1993.
- ASHKENAZI, V.; McLINTOCK, D. Very long base line interferometry: an introduction and geodetic applications. **Survey Review**, v. 26,n. 204, p. 279-88, abril 1982.
- BARBOSA, A. C. **Estudo da Variabilidade Acoplada Oceano-Atmosfera no Atlântico Tropical**. São Paulo, 2007. 116 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo.
- BLITZKOW, D. **Posicionamento por satélite – NAVSTAR/GPS**. São Paulo, 1991. 36p. Apostila –Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- BOLZAN, M. J. A. Transformada em ondaleta: uma necessidade. *Revista Brasileira de ensino de Física*, v 28, n. 4, p. 563-567. 2006.
- BOMFORD, G – *Geodesy*. Oxford University Press, 3rd. Edition, 1977
- BRINKER, C. R.; MINNICK R. *The Surveyng handboock*. Chapman & Hall. N. York, 1995.
- BUENO, R.F. **Avaliação da precisão do sistema GPS/NAVSTAR**. São Paulo, 1995. 209p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- CHYZANOWSKI, A. A comparison of different approaches into the analysis of deformation of deformation measurements. **Proceedings**. Int. Fed. Of Surveyors (FIG) 16th Int. Congr. Montreux, Paper no 602, 1981.
- COBB, S.; O’CONNOR. M. Pseudolites: enhancing GPs with ground-based transmitters. *GPS world*, mar. 1998, p. 55.
- FEDERAL GEODETIC DATA COMMITTEE. Geometric geodetic accuracy standards and specifications for using GPS relative positioning techniques v. 5.0. Rockville. aug. 1989.
- FONSECA JUNIOR, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. São Paulo, 2002. 176 p. Tese (Doutorado) – Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo.

FUSCO, P. B. A Investigação experimental de estruturas. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1996.

FUSCO, P. B. **Fundamentos do Projeto Estrutural**. Editora McGraw-Hill do Brasil/Editora da Universidade de São Paulo – São Paulo 1976

GEMAEL, C. **Ajustamento de observações: aplicações à Geodésia**. Ed. UFPR. Curitiba, 1995.

GREGORIUS, T.; BLEWITT, G. the effect of Weather fronts on GPS measurements. GPS world, may 1998, p. 52.

HEIN et al. Status of Galileo frequency and signal design. 2002 Disponível em: http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/documents/technical_en.htm, acesso em: 03-08-06.

HEIN G. W.; GODET J.; ISSLER J. L.; MARTIN J. C.; ERHARD P.; LUCAS-RODRIGUEZ R.; PRATT T. Status of Galileo frequency and signal design. Disponível em: http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/documents/technical_en.htm. acesso em: 05-08-2006.

HENNEBERG H. G. Estudio comparativo de las mediciones geodesicas realizadas para el complejo hidroelectro “Guri” Venezuela Y para obras similares en el exterior americano y europeo. Universidad Del Zulia, Facultad de Ingenieria Escuela de Ingeniería Geodesica. Maracaibo. 1972

HOFMANN-WELLENHOF, B. et al. Real time GPS: An application for railway engineering. **Development in Geodetic Positioning Methods and Equipments / Resumo em Book of Abstracts of International Association of Geodesy General Meeting**, Beijing, China, p. 51, aug. 1993.

HOFMANN-WELLENHOF. **GPS Theory and practice**. Viena, Springer-Verlag, 1992.

IBGE Padronização de marcos geodésicos. Janeiro 2006.

Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_normas.shtm

Acesso em: 07-02-2007

IGEB. GPS L1 Civil signal Modernization (L1C). L1C Project, final report. July 30, 2004.

KELL, G.; JONES, H.; LACHAPELLE, G.; MOREAU, R., PERRON, M. . A test of airborne kinematic GPS positioning for aerial photography. **Photogrametric**

Engeneering and Remote Sensing. V. 55, nº 12, 1727-1730, 1989. Special issue.

KIM, J. W. The Global Positioning system Serving the World. National Space-Based Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Coordination Office. Palestra proferida no Geobrasil Summit. 19-07-2006.

KUANG, S. **Optimization and Design of Deformation Monitoring Schemes.** Fredericton, New Brunswick, Canada. Ph.D. dissertation. 1991. 179p Department of Surveying Engineering Technical Repost no 157, University of New Brunswick

LANGLEY, R. Propagation of the GPS signal. In: TEUNISSEN, P.; DE JONGE, P.; KLEUSBERG, A. (Ed.) **GPS for Geodesy.** 2 ed., Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag 1998, p. 111- 149.

LANGLEY, R. RTK GPS. **GPS World.** V. 9, no 9, 70 – 76, 1998.

LAROCCA A. P. C. **O uso do GPS como instrumento de controle de deslocamentos dinâmicos de obras civis – aplicação na área de transportes.** 2004. 203 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

LAU L.; CROSS P. Impact of GPS modernization on precise carrier phase-based positioning in the presence of multipath. ION GPS 2003. Portland, Oregon **Proceedings.** Institute of Navigation. 2162-2172 p

LEACH M. P.; HYZAK, M. D. GPS structural monitoring as applied to cable-strayed suspension bridge. **Proceedings.** Int. Fed. Of Surveyors (FIG) 20th Int. Congr. Melbourne, Australia, 606.2/1 – 606.2/12. 1994.

LEICK, A.; LAMBERT, S. Contrib. **GPS Satellite Surveying.** Orono, John Wiley & Sons/New York, 1995.

LOVSE J. W. Et al. Dynamic Deformation Monitoring of tall structures using GPS technology. **Survey Review**, v. 32, n. 252, p. 35-40, june 1994.

MONICO, J. F. G. **Ajustamento das observáveis GPS no contexto de posicionamento geodésico.** Presidente Prudente, 2005. 275 f. Texto (Livre-decência) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

MORETTIN. P. A. **Onda e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas** – São Paulo Editora da Universidade de São Paulo. 1999.

MORETTIN. P. A. TOLOI C. M. C. **Análise de séries temporais** – São Paulo Edgard Blücher. 2006.

OLINTO, C. R. **Estudo experimental das características do escoamento turbulento nas primeiras fileiras de bancos de tubos.** Porto Alegre, 2005. 120 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

PARKINSON, W. P., SPILKER Jr. J.J. **Global Positioning System: Teory and Applications**. Progress in astronautics and aeronautics v. 163. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington. 1996.

PARKINSON, W. P., SPILKER Jr. J.J. **Global Positioning System: Teory and Applications**. Progress in astronautics and aeronautics v. 164. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington. 1996.

PENNER, E. **Avaliação de desempenho de sistemas estruturais de pontes de concreto**. São Paulo, 2001. 256p. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo, 2001.

PERCIVAL, D. B., Walden A. T. **Spectral Analysis for Physical Aplications: multitaper and conventional univariate techniques**. New York, Cambridge University Press, 1993.

PINTO, S. C. D. **Análise de formas 3D usando Wavelets 1D, 2D e 3D**. São Carlos, 2005. 90 p. Tese (Doutorado). Instituto de Física da Universidade de São Paulo

REMONDI, B.W. Kinematic and pseudo-kinematic GPS. In: ION GPS-88. **proceedings**. Colorado Springs, Colorado, 21-23, SEP, 1988. p. 115-121.

REMONDI, B.W. **Performing Centimeter-Level Surveys in Seconds with GPS Carrier Phase: initial results**. Rockville, NOAA/NOS/NGS, 1985. (memorando técnico)

REMONDI, B.W. **Using the global positioning system (GPS) phase observable for relative geodesy: modeling, processing, and results**. Austin, Texas, 1984. 359p. Dissertation (Doctoral) - Center for Space Research, University of Texas at Austin.

ROCKWELL INTERNATIONAL CORPORATION. **Interface control document - GPS-200**. Downey, California. 1984.

RODRIGUES, J. F. S. **Ações induzidas por multidões em estruturas de arquibancadas**. 223 p. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo, 2006.

SCHAAL, R. E. **Influência da propagação da onda e do equipamento nas medidas de código e da fase com o Sistema de Posicionamento Global - GPS**. 150 p. Tese de Livre-Docência. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2006.

SCHAAL, R. E. **Medições de deslocamentos em obras civis de grande porte com GPS**. Proposta de metodologia de análise dos resultados e tratamento dos dados. 113 p. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo, 1998.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. New York, Walter de Gruyter, 2003.

SHAAL. R. E.; PACILÉO NETTO, N.; FONSECA JR., E. S.; CINTRA, J. P.; BUENO, R. F.; GODOI, I. A. Displace measurements at Armenia Bridge, São Paulo, Brazil with GPS – Preliminary Results. II Congresso Venezolano de Geodesia, VI Encuentro Internacional de Mediciones Geodésicas y de Cartografía.

SHAN-LONG, K. **Optimization and Design of Deformation Monitoring Schemes.** 179 p. Ph. D dissertation, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada. 1991.

SICKLE, J. V. GPS for land surveyors. Chelsea, Michigan. Ann Arbour Press, Inc. 1996

TEUNISSEN, P.; DE JONGE, P.; KLEUSBERG, A. (Ed.) **GPS for Geodesy.** 2 ed., Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag 1998.

TRIMBLE NAVIGATION. Trimble Geomatics Office Network adjustment User Guide. Sunnyvale, jan. 2001. (manual do usuário e guia de referência técnica)

TRIMBLE NAVIGATION. Trimvec-Plus GPS Survey Software. Sunnyvale, sept. 1991. (manual do usuário e guia de referência técnica)

TRIMBLE NAVIGATION. Trimble Geomatics Office v 1.5, WAVE Baseline Processing. User Guide. Sunnyvale, CA 94088-3642 U.S.A. January 2001

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and Design – Structural Deformation Surveying – EM 1110-2-1009.** Washington, DC, USA. 1 jun. 2002.

VACONCELLOS, J. C. P. **Estudo de metodologia para vinculação e homogeneização de redes geodésicas GPS – implementação de um programa de ajustamento.** 2003. 194 p. + apêndices Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

VAN DIGGELEN, F. GPS accuracy: Lies, Dam lies, and Statistics. GPS world. Jan. 1998, p. 41.

VAN LANGENDONCK, T. **Resistências dos materiais, tensões. Curso de mecânica das estruturas.** Editora Científica. Rio de Janeiro, 1956.

WANNIGER, L.; CAMPOS, M.A. Equatorial scintillations and GPS receiver performance. Apresentado ao laboratório de topografia e geodésia, march 13, 1992.

ZAGOTTIS, D. Concreto Armado e Protendido – sobre a introdução da segurança no projeto estrutural. Quarto colóquio sobre comportamento e projeto de estruturas. PUC/RJ. 1987.