

**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 interest.

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 structures 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 |

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

