UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JOSÉ VENÂNCIO MARRA OLIVEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PONTE DE
CONCRETO POR MEIO DE FILTRAGEM DE SINAIS GPS**

São Carlos

2018

JOSÉ VENÂNCIO MARRA OLIVEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PONTE DE
CONCRETO POR MEIO DE FILTRAGEM DE SINAIS GPS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de “Mestre em Ciências”. Programa: Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes – Geomática.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Camargo Larocca

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Oliveira, José Venâncio Marra
Análise do comportamento dinâmico de ponte de
concreto por meio de filtragem de sinais GPS / José
Venâncio Marra Oliveira; orientadora Ana Paula Camargo
Larocca. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Infraestrutura de Transportes -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. GPS. 2. Inspeção de pontes. 3. Ponte de
concreto. 4. FFT. 5. CWT. 6. Chebyshev. 7. Passa-Faixa.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOSÉ VENÂNCIO MARRA OLIVEIRA**.

Título da dissertação: "Análise do comportamento dinâmico de ponte de concreto por meio de filtragem de sinais GPS".

Data da defesa: 06/09/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Associada **Ana Paula Camargo Larocca**
(**Orientadora**)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

aprovado

Profa. Dra. **Eniuce Menezes de Souza**
(Universidade Estadual de Maringá/UEM)

aprovado

Prof. Dr. **Mauricio Roberto Veronez**
(Universidade do Vale do Rio dos Sinos/UNISINOS)

aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:
Prof^a. Associada **Ana Paula Camargo Larocca**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

*Aos meus avós Iracema e Bernardino (in
memoriam), aos meus pais Teresinha e
Robson, e aos meus irmãos pela
compreensão, carinho e apoio
incansável.*

AGRADECIMENTOS

Aqui expresso minha gratidão àqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para o andamento e término desta pesquisa de mestrado.

Ao meu Deus, que não me deixou perder a fé e fraquejar nos momentos difíceis deste trabalho.

A professora Dra. Ana Paula Camargo Larocca pela valiosa oportunidade da orientação, amizade, preocupação, motivação, paciência e pela confiança depositada para o desenvolvimento deste trabalho, que me permitiu desenvolver pessoal e profissionalmente.

Ao professor Dr. João Olympio de Araújo Neto pela concessão dos dados e apoio para o andamento deste trabalho.

Ao amigo professor Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis pelo meu ingresso à pesquisa por meio de bolsa de IC na UFU campus Monte Carmelo no período de graduação e pela motivação para ingressar no mestrado.

Aos amigos Jales, Pedro, Willian, Clarissa, Valmir e aos outros amigos que não foram citados aqui, mas tiveram grande importância no apoio ao ingresso no mestrado e amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC-USP pelo apoio, amizade e conhecimento compartilhado.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC-USP pela amizade e pelo espírito solidário.

A todos meus amigos do Departamento de Engenharia de Transportes que conviveram, auxiliaram e motivaram o meu desenvolvimento pessoal e profissional, em especial Sérgio, Tiago, Chico, Piva, Rosuel, Gabi, Daniela, Guilherme, Felipe, Igor, Aurenice, Luan, Elaine, pelos conselhos, conversas, risadas, cervejas, cafés e bandejão

compartilhados. E aos outros amigos e colegas que não foram citados, porém estiveram comigo em momentos diversos.

A minha querida namorada, pelo amor, companheirismo, apoio e carinho constantes em todos os momentos. Com você esta trajetória passou a ser mais tranquila, Ranizis.

A minha avó Iracema e avô Bernardino (*in memoriam*) por todo amor, apoio, incentivo e educação. Sem vocês não seria o que sou.

Aos meus pais Teresinha e Robson por todos os esforços, amor, carinho e educação que me deram.

Aos meus irmãos Álys, Aline e Samara, que estiveram sempre comigo mesmo estando longe e me fazem buscar ser melhor a cada dia.

E a todos que contribuíram de certa forma para o êxito deste trabalho.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”.

Meu muito obrigado!

“Vale a pena lembrar que, embora haja uma vasta diferença entre nós no que diz respeito aos fragmentos que conhecemos, somos todos iguais no infinito da nossa ignorância.”

Karl Popper (1902-1994)

OLIVEIRA, J. V. M. **Análise do comportamento dinâmico de ponte de concreto por meio de filtragem de sinais GPS**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

RESUMO

Esta pesquisa propôs uma contribuição aos procedimentos de inspeção de pontes por meio de um plano de monitoramento de curta duração do comportamento dinâmico do tabuleiro de pontes rodoviárias de concreto com a utilização de receptores GPS de 100 Hz associado à diversas técnicas de filtragem de sinais. O estudo foi conduzido em uma ponte em serviço localizada na rodovia Fernão Dias (BR-381). O procedimento de inspeção proposto baseou-se no uso de dois sinais de satélites GPS, por meio da aplicação do Método Residual de Fase (MRF), e da análise temporal dos resíduos da dupla diferença de fase a partir da *Fast Fourier Transform* (FFT), *Continuous Wavelet Transform* (CWT), Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I. A descrição do comportamento dinâmico do tabuleiro do vão central da ponte se deu por meio da extração dos valores de frequência e amplitude das deflexões verticais a partir dos dados GPS filtrados (resíduos), em três períodos de amostragem de 1 minuto. Os valores de frequência variaram de 0,5 Hz a 8 Hz nos três períodos de amostragens e também nos filtros FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I. Os valores de amplitude de deslocamento vertical máximo ficaram em torno de 6 mm. Estes valores coincidiram com os valores de frequência e amplitude de deslocamento vertical registrados pela instrumentação clássica com acelerômetros, transdutores de deslocamento vertical, modelagem por elementos finitos e prova de carga estática e dinâmica realizadas sobre tabuleiro do vão central da ponte instrumentado. Por fim, pode-se afirmar que os procedimentos propostos, além de poderem ser utilizados como uma etapa preliminar de inspeção de tabuleiro de pontes rígidas possibilitaram a detecção de deslocamentos dinâmicos verticais milimétricos e suas frequências de vibração.

Palavras-chave: GPS; Inspeção de pontes; Ponte de concreto; FFT; CWT; Chebyshev; Passa-Faixa.

OLIVEIRA, J. V. M. **Analysis of the dynamic behavior of concrete bridges by GPS signals filtering.** 2018. Dissertation (Master) – São Carlos Engineering School, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

ABSTRACT

This research proposed a contribution for bridge inspection procedures at of a short-term monitoring plan of the dynamic behavior of the concrete road bridge with the use of 100 Hz GPS receivers associated with various signal filtering techniques. The study was conducted in the service bridge located on the highway Fernão Dias (BR-381). The procedure inspection proposed was based on the use of two satellite GPS signals, by applying the Phase Residual Method (PRM), and the temporal analysis of the residuals of the double difference phase from the Fast Fourier Transform (FFT), Continuous Wavelet Transform (CWT), Type I Chebyshev Band-Pass. The dynamic behavior of the central span of the bridge was described by extracting the frequency and amplitude values of the vertical deflections from the filtered GPS data (residues), in three sampling periods of 1 minute. The frequency values found ranged from 0.5 Hz to 8 Hz in the three sampling periods as well as in the FFT, CWT and Chebyshev Type I Band-Pass filters. The maximum vertical displacement peak values were around 6 mm. These values coincided with the vertical displacement and amplitude values recorded by the classical instrumentation with accelerometers, vertical displacement transducers, finite element modeling and static and dynamic load test performed on the central span deck of the instrumented bridge. Finally, it could affirm that the procedures proposed, besides being able to be used as a preliminary step of inspection of the rigid bridge's deck enabled the detection of millimetric vertical dynamic displacements and their frequencies of vibration.

Keywords: GPS; Bridge inspection; Concrete bridge; FFT; CWT; Chebyshev; Band-Pass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ponte sobre o rio Tamanduateí – São Paulo/SP	29
Figura 2: Ponte de Pedra Branca – Laranjeiras/SE	30
Figura 3: Ponte de Jaguari/RS	30
Figura 4: Ponte sobre o rio Santo Antônio – Guia Lopes de Laguna/MS.....	31
Figura 5: Bloco do viaduto da Galeria dos Estados – Eixão Sul – Brasília/DF.....	31
Figura 6: Teste de monitoramento realizado na ponte de treliça metálica, século XIX	33
Figura 7: Localização da ponte sobre o rio Jaguari.....	50
Figura 8: Ponte sobre o rio Jaguari	51
Figura 9: Seção transversal da ponte sobre o rio Jaguari	51
Figura 10: Ponte sobre o rio Jaguari	52
Figura 11: Sinais de deslocamento vertical da longarina A	56
Figura 12: Sinais de deslocamento vertical da longarina B	56
Figura 13: Localização dos transdutores de deslocamento e acelerômetros	57
Figura 14: Deslocamentos verticais medidos durante um ensaio de 30 min – tráfego normal de veículos.....	58
Figura 15: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 20 km/h – vão de 30 m	58
Figura 16: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 40 km/h – vão de 30 m	59
Figura 17: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 60 km/h – vão de 30 m	59
Figura 18: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 90 km/h – vão de 30 m	59
Figura 19: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o tráfego normal de veículos – vão de 30 m	60
Figura 20: Princípio da Interferometria de fase com os sinais e antenas GPS – Ponte suspensa e estaiada	61
Figura 21: Método da dupla diferença de fase – Disposição dos satélites de referência e medidor.....	62
Figura 22: Fluxograma do método	63
Figura 23: Antenas do receptor <i>rover</i> (A) e do receptor base (B).....	64

Figura 24: <i>Sky Plote</i> - Disposição dos satélites considerados	66
Figura 25: Azimute e elevação dos satélites em relação ao receptor <i>rover</i>	66
Figura 26: Resíduos Brutos OEM+GPS – Teste IFSULDEMINAS	67
Figura 27: Espectro – OEM+GPS – Filtro FFT	68
Figura 28: Escalograma – OEM+GPS - Filtro CWT	68
Figura 29: Espectro – OEM+GPS – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz - 5 Hz	69
Figura 30: Filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz - 0,5 Hz	70
Figura 31: Espectro – OEM+GPS - Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz - 0,5 Hz	70
Figura 32: Resíduos Brutos – Período A.....	72
Figura 33: Histograma de resíduos brutos – Período A	72
Figura 34: Resíduos Brutos – Período B.....	73
Figura 35: Histograma de resíduos brutos – Período B	73
Figura 36: Resíduos Brutos – Período C.....	74
Figura 37: Histograma de resíduos brutos – Período C	74
Figura 38: Espectro – Filtro FFT – Período A	75
Figura 39: Espectro – Filtro FFT – Período B	76
Figura 40: Espectro – Filtro FFT – Período C	76
Figura 41: Escalograma – Filtro CWT – Período A – Multicaminhamento	77
Figura 42: Escalograma – Filtro CWT – Período B – Multicaminhamento	77
Figura 43: Escalograma – Filtro CWT – Período C – Multicaminhamento	77
Figura 44: Escalograma – Filtro CWT – Comportamento da estrutura sobre influência do tráfego de veículos – Período A	78
Figura 45: Escalograma – Filtro CWT – Comportamento da estrutura sobre influência do tráfego de veículos – Período B.....	78
Figura 46: Escalograma – Filtro CWT – Comportamento da estrutura sobre influência do tráfego de veículos – Período C.....	79
Figura 47: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz a 9,0 Hz – Período A.....	80
Figura 48: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz a 9,0 Hz – Período B	80

Figura 49: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz a 9,0 Hz – Período C	81
Figura 50: Resíduos Brutos – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz	82
Figura 51: Histograma de resíduos brutos – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz	83
Figura 52: Resíduos Brutos – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz.....	83
Figura 53: Histograma de resíduos brutos – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz	84
Figura 54: Resíduos Brutos – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz.....	84
Figura 55: Histograma de resíduos brutos – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz	85
Figura 56: Espectro – Filtro FFT – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz	86
Figura 57: Espectro – Filtro FFT – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz	86
Figura 58: Espectro – Filtro FFT – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz	86
Figura 59: Escalograma – Filtro CWT – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz	87
Figura 60: Escalograma – Filtro CWT – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz.....	87
Figura 61: Escalograma – Filtro CWT – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz.....	88
Figura 62: Escalograma – Filtro CWT – Resposta do tabuleiro à ação tráfego normal – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz.....	88
Figura 63: Escalograma – Filtro CWT – Resposta do tabuleiro à ação tráfego normal – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz.....	89
Figura 64: Escalograma – Filtro CWT – Resposta do tabuleiro à ação tráfego normal – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz.....	89
Figura 65: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,5 Hz a 9,0 Hz – Período A.....	90
Figura 66: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,5 Hz a 9,0 Hz – Período B	91
Figura 67: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,5 Hz a 9,0 Hz – Período C	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	–	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACPW	–	Análise de Componentes Principais da <i>Wavelet</i>
ADFN	–	<i>Adaptative Filter Network</i>
ANFIS	–	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i>
ANTT	–	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ARIMA	–	<i>Autoregressive Integrated Moving Average</i>
ARMA	–	<i>Autoregressive Moving Average</i>
BDI	–	<i>Bridge Diagnostics Incorporated</i>
BPN	–	<i>Back-Propagation Network</i>
CFN	–	<i>Cascade Back-Propagation</i>
CBUQ	–	Concreto Betuminoso Usinado Quente
cm	–	Centímetro
CREA-SE	–	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Sergipe
CWT	–	<i>Continuous Wavelet Transform</i>
dB	–	Decibéis
DF	–	Distrito Federal
DNIT	–	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EESC	–	Escola de Engenharia de São Carlos
EKFN	–	<i>Extended Kalman Filter Network</i>
FFT	–	<i>Fast Fourier Transform</i>
GDF	–	Governo do Distrito Federal
GLONASS	–	<i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GMEC	–	Grupo de Modelagem de Estruturas de Concreto
GNSS	–	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	–	<i>Global Positioning System</i>
h	–	Hora
Hz	–	Hertz
IIR	–	<i>Infinite Impulse Response</i>
km	–	Quilômetro
Ls	–	<i>Length of spiral</i>

m	–	Metro
MEF	–	Método de Elementos Finitos
min	–	Minuto
mm	–	Milímetro
MRF	–	Método do Resíduo de Fase
MS	–	Mato Grosso do Sul
NBR	–	Norma Brasileira
NNARMAX	–	<i>Neural Network Auto-Regressive Moving Average</i>
OAE	–	Obra de Arte Especial
OAEs	–	Obra de Artes Especiais
OEM	–	Oscilador Eletromecânico
PPP	–	Posicionamento por Ponto Preciso
RS	–	Rio Grande do Sul
RTK	–	<i>Real Time Kinematic</i>
SGO	–	Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais
SHM	–	<i>Structural Health Monitoring</i>
SINAENCO	–	Sindicato Nacional das Empresas de Arquitetura e Engenharia Consultiva
SV	–	<i>Satellite Vehicle</i>
TCU	–	Tribunal Contas da União
USP	–	Universidade de São Paulo
UVP	–	Unidades de Veículo Padrão
V/C	–	Volume/Capacidade
VDMA	–	Volume Diário Médio Anual
VDMPA	–	Volume Diário Médio Pedagiado Anual
VHP	–	Volume da Hora-Pico
WPS	–	<i>Wavelet Power Spectrum</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	23
1.1.	OBJETIVOS.....	25
1.1.1.	Objetivo Geral	25
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	25
1.2.	HIPÓTESE	25
1.3.	JUSTIFICATIVAS.....	26
1.4.	ETAPAS DO TRABALHO	27
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1.	PANORAMA HISTÓRICO.....	29
2.2.	INSPEÇÃO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS	32
2.3.	MANUTENÇÃO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS	32
2.4.	MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS	33
3.	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE - O USO DE RECEPTORES GPS NO MONITORAMENTO DE PONTES.....	36
3.1.	O USO DA TECNOLOGIA GPS NA INSPEÇÃO DE OBRAS DE ARTE VIÁRIAS	36
3.2.	O USO DA TECNOLOGIA GNSS NA INSPEÇÃO DE OBRAS DE ARTE VIÁRIAS E OUTRAS ESTRUTURAS.....	36
3.3.	O USO DA TECNOLOGIA GNSS NA INSPEÇÃO DE PONTES SUSPENSAS E ESTAIADAS	37
3.4.	O USO DA TECNOLOGIA GNSS NA INSPEÇÃO DE PONTES DE CONCRETO ARMADO.....	39
3.5.	FILTRAGEM DE SINAIS DE GPS	41
3.5.1.	Filtragem com FFT.....	43
3.5.2.	Filtragem com CWT.....	44
3.5.3.	Filtragem com Chebyshev	46
3.5.4.	Filtragem prévia: Filtro Passa-Faixa.....	48
3.6.	TIPOS DE RECEPTORES GNSS	49
3.7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
4.	MATERIAIS E MÉTODO.....	50
4.1.	MATERIAIS	50
4.1.1.	Apresentação do objeto de experimento: a ponte sobre o rio Jaguari	50

4.1.2.	Caracterização do tráfego.....	52
4.1.3.	Monitoramento contínuo da ponte sobre o rio Jaguari	53
4.1.4.	Softwares	54
4.1.5.	Receptores GNSS.....	54
4.1.6.	Dados da instrumentação convencional da ponte.....	54
4.2.	MÉTODO.....	60
5.	EXPERIMENTOS DE CAMPO	64
5.1.	EXPERIMENTO PRELIMINAR OEM+GPS.....	64
5.2.	EXPERIMENTO NA PONTE SOBRE O RIO JAGUARI	65
5.3.	AZIMUTE E ELEVAÇÃO DOS SATÉLITES EM RELAÇÃO À PONTE	65
6.	RESULTADOS.....	67
6.1.	DADOS COLETADOS NO EXPERIMENTO PRELIMINAR OEM+GPS	67
6.2.	DADOS DE GPS DE 100 HZ DO LEVANTAMENTO NA PONTE SOBRE O RIO JAGUARI	71
6.3.	FILTRAGEM DOS DADOS DE GPS DO LEVANTAMENTO NA PONTE JAGUARI.....	75
6.4.	FILTRAGEM PRÉVIA: FILTRO PASSA-FAIXA – RESÍDUOS DE GPS DO LEVANTAMENTO NA PONTE JAGUARI – FAIXA: 0,5 HZ A 25 HZ.....	82
6.5.	FILTRAGEM DOS DADOS DA FILTRAGEM PRÉVIA – FAIXA 0,5 HZ A 25 HZ	85
7.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	93
7.1.	CONCLUSÕES.....	93
7.2.	TRABALHOS FUTUROS.....	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

1. INTRODUÇÃO

O Tribunal Contas da União (TCU) publicou um relatório no ano de 2012, em que declarou um número de 4.469 pontes e viadutos sob jurisdição do órgão, abandonados e sem um programa efetivo de manutenção e recuperação. Este patrimônio foi estimado em R\$ 13 bilhões de reais e estão distribuídos pela malha rodoviária brasileira. De acordo com o TCU (2012), apenas 25% das obras de arte que integram a malha rodoviária nacional estavam cadastradas no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO). Este sistema foi criado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias em 1994 e mantido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para o gerenciamento das inspeções regulares das Obras de Arte Especiais (OAEs). O TCU constatou que as últimas informações inseridas no sistema ocorreram no ano de 2004.

O relatório do TCU também constatou que 59% das pontes e estruturas não receberam a manutenção adequada e somente 41% das inspeções ocorreram de forma periódica. O órgão público recomendou que as inspeções sejam realizadas pelo menos a cada dois anos. As inspeções, entretanto, ocorrem em sua maioria quando existem danos estruturais graves. Isso foi constatado em 31% dos casos das inspeções.

Segundo um informativo do DNIT especialistas realizaram vistorias nas OAEs entre os anos de 2012 e 2015. As inspeções foram realizadas em 4.020 OAEs, de um total de 5.114. Em que, 14,65% apresentaram condições ótimas, 38,23% condições boas e 42,28% condições regulares. O principal objetivo destas inspeções foi de alimentar o banco de dados de cadastramento de OAEs no SGO.

De acordo com a SINAENCO (2017), no período de 2012 a 2016, a prefeitura da cidade de São Paulo, por exemplo, teve um gasto de 30 milhões/ano com despesas de manutenção de obras de arte, sendo 240 pontes e viadutos, 75 passarelas e 700 pontilhões, sendo que do total de pontes e viadutos, 50% apresentaram problemas simples, com custo de até R\$ 20 mil reais, e 10% apresentaram problemas complexos.

De acordo com Mendes (2009), 78% das pontes de concreto nacionais foram construídas antes de 1984, anteriores à vigência da norma NBR 7188:1984. Esta norma descreve as condições exigidas de cargas móveis a serem consideradas no cálculo das pontes rodoviárias e das passarelas de pedestres (ABNT, 1984). Estas pontes foram projetadas com capacidade de carga inferior a praticada pelos novos caminhões de carga, indicando a necessidade de reforço estrutural emergente. A redução de gastos no setor rodoviário brasileiro, a ineficiência do Poder

Público em gerir e fiscalizar as manutenções e as inspeções das OAEs converge para a execução de obras de reforço, demolição e reconstrução destas pontes.

A capacidade de monitorar de forma periódica ou contínua a condição estrutural de uma ponte, para a detecção de danos em estágio inicial ou alterações das condições de projeto e os problemas de vibração, é ação importante para a manutenção da saúde estrutural das OAEs. A inspeção de pontes, passarelas e viadutos tem como finalidade identificar as características modais das OAEs a partir das medições das respostas da estrutura sujeitas a excitações ambientais ou naturais (vento, tremores, tráfego etc.) para apontar o seu estado geral e as necessidades de reparos na estrutura (EWINS, 1984; BROWNJOHN *et al.*, 1989; AGARDH, 1991; FELBER, 1993; MAGALHÃES, CUNHA e CAETANO, 2012; ARAÚJO e LAIER, 2014).

O monitoramento estrutural ora se satisfaz com a inspeção visual e ora requer a instalação de instrumentos para detecção de frequências de oscilação e amplitudes de deslocamento de elementos da estrutura, por exemplo. A instalação de instrumentos estruturais convencionais (acelerômetros, transdutores de deslocamento, entre outros) de monitoramento nem sempre é simples e requer, entre outros itens, de fonte de energia próximo da ponte a ser monitorada, de calibração, de conexão com sistemas de aquisição de dados e de microcomputadores, da instalação de suportes e ou de andaimes para a fixação na estrutura (ANDRADE, 2012; ARAÚJO, 2015).

O desenvolvimento e aplicação de técnicas de análise modal, que utilizem informações de resposta estrutural, são necessários para obter parâmetros modais confiáveis (acelerações, deslocamentos, velocidades etc.) de uma estrutura. Dessa maneira, esta pesquisa propôs a apresentação de procedimentos de inspeção de pontes por meio de monitoramento de curta duração do comportamento dinâmico vertical do tabuleiro das pontes rodoviárias de concreto armado em serviço, com uso de receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e da análise do comportamento dinâmico vertical a partir de técnicas de filtragem dos sinais de GPS.

A ponte de concreto armado utilizada como estudo de caso neste trabalho encontrava-se em serviço. O grande parque de pontes rodoviárias de concreto da infraestrutura viária do país e a utilização de receptores GNSS com taxa de gravação de dados de 100 Hz aliados às técnicas de filtragens dos sinais de GPS foram os fatores que viabilizaram o monitoramento geodésico da ponte de concreto deste trabalho. O estudo foi realizado na ponte sobre o rio Jaguari no município de Extrema, Minas Gerais, que tem a particularidade de ter o tabuleiro em curva com um raio de 305,5 m, uma superelevação contínua de 8%. E esse foi justamente o motivo que levou à sua instrumentação estrutural, pois os veículos, notadamente os pesados, ao

frenarem na passagem pelo tabuleiro em curva podem provocar esforços que contribuem para o escorregamento e torção do tabuleiro em relação aos pilares de sustentação.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral foi propor um método para a análise do comportamento dinâmico vertical do vão central de um tabuleiro de uma ponte de concreto armado sem interrupção do tráfego veicular a partir da filtragem de sinais de GPS, pelo Método Residual de Fase (MRF) e detectar as frequências e amplitudes da oscilação ou vibração vertical.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Identificar da vibração vertical do vão central de tabuleiro de pontes de concreto sob a ação de carga dinâmica do tráfego veicular normal, por meio dos resíduos do processamento da dupla diferença de fase da onda portadora L_1 ;
- Complementar as informações sobre a condição da estrutura por meio da filtragem dos resíduos do processamento da dupla diferença de fase da portadora L_1 em *Fast Fourier Transform* (FFT), *Continuous Wavelet Transform* (CWT) e Chebyshev;
- Apresentar a contribuição de cada técnica de filtragem;
- Minimizar os efeitos ruidosos no sinal GPS a partir da aplicação de técnicas de filtragem.

1.2. HIPÓTESE

É possível descrever o comportamento dinâmico vertical do vão central de pontes de concreto armado a partir de medições e filtrações realizadas nos resíduos da dupla diferença de fase da portadora L_1 de dois sinais de satélites da constelação GPS.

1.3. JUSTIFICATIVAS

A instrumentação geodésica tem sido utilizada como complementar a instrumentação convencional em estruturas – descrita aqui como a que envolve o uso de instrumentos como os acelerômetros, os *strain gages* (extensômetros elétricos), os transdutores de deslocamentos e outros equipamentos. A sua vantagem em relação aos instrumentos convencionais reside no fato de que as medições são realizadas a partir de uma referência fora da estrutura em observação, ao passo que os ditos convencionais são diretamente instalados na estrutura observada e por isso, em algumas situações, podem requerer confirmação dos resultados encontrados.

Diversos fatores motivaram o desenvolvimento desta pesquisa, com isso destacam-se:

- A disponibilização de um procedimento de investigação estrutural rápido, em relação aos procedimentos convencionais, que ao indicarem alguma alteração do comportamento dinâmico estrutural com relação ao definido em projeto, justificaria a realização da inspeção com os equipamentos convencionais. Isto motivado pelo fato de que a instalação de instrumentos convencionais requer tempo e custo maiores de equipe técnica em campo que as medições com instrumentos topográficos e geodésicos;
- Disseminar e popularizar no Brasil o potencial do GPS no monitoramento de curta duração e sem a interrupção de tráfego nas pontes e viadutos em serviço. Esses instrumentos não necessitam do deslocamento de uma equipe técnica especializada, de sistema de aquisição de dados, permitem trabalhar em diferentes condições climáticas, não necessitam de calibração e permitem obter respostas estruturais com confiabilidade;
- Contribuir com o registro de dados para a análise e monitoramento sobre o comportamento dinâmico dos vãos de pontes, que estão sujeitos a carregamentos de veículos com grande variação, tanto no peso quanto na configuração de seus eixos, além de trafegarem em diferentes velocidades pela malha viária nacional.

1.4. ETAPAS DO TRABALHO

As etapas deste trabalho tiveram por base a revisão bibliográfica, o estudo de trabalhos correlatos, a experimentação em campo, a proposição e a efetivação de monitoramento geodésico de curta duração em uma ponte rodoviária curva de concreto armado em serviço e a confrontação dos resultados de comportamento dinâmico vertical a partir das filtrações dos sinais de GPS com os valores de comportamento dinâmico vertical obtido por modelagem numérica e com prova de carga, antecedentes a este trabalho. A modelagem numérica e a prova de carga foram realizadas previamente pelo Grupo de Modelagem de Estruturas de Concreto (GMEC), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Primeiramente, executou-se uma revisão bibliográfica do estado-da-arte em monitoramento de OAEs de diferentes tipos e características, com o intuito de identificar conceitos relacionados à aplicação de técnicas de monitoramento geodésico, receptores GNSS de diferentes taxas de amostragem, técnicas de filtração dos sinais de GPS e os métodos de análise, como as vantagens e desvantagens de seu uso em inspeção de pontes.

Em seguida, foi apresentado o objeto de estudo, a ponte sobre o rio Jaguari. Esta Obra de Arte Especial (OAE) faz parte do trecho da rodovia Fernão Dias, que está concessionada pela ARTERIS S.A. Posteriormente, foi realizado o monitoramento de curta duração na ponte a partir de receptores GNSS de 100 Hz. Ao final, os dados de GPS foram processados e obtiveram-se os resíduos brutos, que foram filtrados com a FFT, CWT e Chebyshev para descrever o comportamento dinâmico vertical da estrutura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Torna-se válido iniciar o texto sobre a pesquisa bibliográfica ressaltando que o autor buscou destacar assuntos para que um leitor não especialista em Engenharia de Estruturas consiga fazer a devida conexão técnica entre a necessidade de inspeção, a manutenção e as técnicas geodésicas de medições aplicadas ao monitoramento de OAE. O autor não teve a pretensão de discorrer sobre aspectos técnicos estruturais da ponte em questão, que podem ser buscados pelo leitor nas referências clássicas sobre o assunto na bibliografia nacional ou internacional e tão pouco de propor soluções para recuperação e ou reforço da estrutura em estudo (CHRZANOWSKI *et al.*, 1988; CHRZANOWSKI, CHEN e LEAL, 1990; LOVSE *et al.*, 1995; ROBERTS, MENG e DODSON, 2001).

Pontes, viadutos e passarelas possuem distinções. A ponte rodoviária foi definida pela NBR 7188:1984 (ABNT, 1984) como *“toda e qualquer estrutura destinada a permitir a transposição de um obstáculo, natural ou artificial, por veículos rodoviários passíveis de trafegar na via terrestre de que esta ponte faz parte”*. De acordo com a NBR 7188:2013 (ABNT, 2013) a ponte foi definida como uma *“estrutura sujeita a ação de carga em movimento, com posicionamento variável, aqui chamada de carga móvel, utilizada para transpor um obstáculo natural (rio, córrego, vale etc.)”*, o sendo viaduto uma *“estrutura para transpor um obstáculo artificial (avenida, rodovia etc.)”* e a passarela uma *“estrutura longilínea, destinada a transpor obstáculos naturais e/ou artificiais exclusivamente para pedestres e/ou ciclistas”*.

Os elementos que constituem as pontes são a superestrutura, mesoestrutura, infraestrutura e encontros (DNIT, 2016). A superestrutura de uma ponte se encontra acima dos apoios, tais como as vigas, as lajes, o tabuleiro – que recebe a ação direta do carregamento móvel e transfere para a mesoestrutura, a pista de rolamento, as juntas de dilatação etc. A mesoestrutura é constituída pelos pilares e apoios, que se subdividem em vão parciais a extensão total da ponte. A infraestrutura é compreendida pelos elementos estruturais como blocos, sapatas, tubulões, estacas, blocos de coroamento de estacas, vigas de ligação entre outros, que são responsáveis em transferir os carregamentos da mesoestrutura ao terreno na qual a ponte se encontra. E os encontros que são elementos que permitem a contenção e estabilização dos aterros e possibilita a transição entre a via e a OAE.

2.1. PANORAMA HISTÓRICO

A seguir foram apresentados alguns casos de deterioração e falha estrutural em pontes de concreto causada pela ausência de inspeção e manutenção.

No dia 11 de Novembro de 2015 uma ponte de concreto entrou em colapso sobre o rio Tamanduateí na zona leste de São Paulo, sem vítimas. Esta obra de arte possuía 16 metros de largura e um vão de 40 metros de comprimento. Esta estrutura fazia ligação entre as avenidas Professor Luiz Inácio de Anhaia Melo e Doutor Francisco, no bairro Ipiranga. A causa da falha estrutural envolveu diversos fatores, dentre eles a ausência de manutenção, descarte de entulho e lixo sobre a estrutura. A Figura 1 mostra a ponte sobre o rio Tamanduateí antes e após colapsar.

Figura 1: Ponte sobre o rio Tamanduateí – São Paulo/SP

Fonte: Rede Globo (2015).

No dia 9 de Maio de 2015 uma ponte de concreto armado desabou no povoado de Pedra Branca, no município de Laranjeiras, em Sergipe. A ponte sustentava duas adutoras que forneciam água para a capital Aracaju e outros municípios. Esta obra de arte especial possuía mais de 80 anos e a última manutenção foi realizada pelo Estado no ano de 1994. O laudo realizado pelo do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Sergipe (CREA-SE) concluiu que o desabamento da ponte foi causado pela corrosão de cabos de aço. O monitoramento e a manutenção das obras de artes especiais são decisivos para uma maior durabilidade da estrutura e segurança aos usuários. A Figura 2 mostra a situação da ponte de Pedra Branca após o colapso.

Figura 2: Ponte de Pedra Branca – Laranjeiras/SE

Fonte: Rede Globo (2015).

Em 31 de Maio de 2015 uma ponte no município de Jaguari/RS entrou em colapso. O vão de 30 m se rompeu enquanto um caminhão bi-trem vazio trafegava sobre a estrutura. O acontecimento não gerou vítimas fatais, porém o acesso à cidade ficou limitado. A Figura 3 apresenta a ponte após o colapso.

Figura 3: Ponte de Jaguari/RS

Fonte: Rede Globo (2015).

A ponte de concreto sobre o rio Santo Antônio, na rodovia MS-382, no município de Guia Lopes de Laguna/MS, desabou no dia 2 de Janeiro de 2016. A causa do colapso da estrutura envolveu um conjunto de fatores como a erosão do aterro, apoios das vigas da superestrutura precários e ineficiência estrutural. Esta ponte teve um custo de 1,3 milhões de reais e um período de vida útil curto, pois havia sido inaugurada em 2012. A Figura 4 apresenta o estado da ponte após o colapso.

Figura 4: Ponte sobre o rio Santo Antônio – Guia Lopes de Laguna/MS

Fonte: Dourados News (2016).

No dia 02 de Fevereiro de 2018 parte do viaduto da Galeria dos Estados, no Centro de Brasília, colapsou e impossibilitou o trânsito sob o Eixão Sul. Não houve vítimas. Um estudo sobre a situação de 17 viadutos na região central de Brasília, incluindo o viaduto que desabou, foi realizado há 12 anos para o Governo do Distrito Federal (GDF) e os considerou em estado crítico. A necessidade de intervenção e recuperação dos viadutos foi considerada urgente, porém nenhuma intervenção foi realizada. A Figura 5 apresenta o bloco do viaduto da Galeria dos Estados no Eixão Sul em Brasília/DF.

Figura 5: Bloco do viaduto da Galeria dos Estados – Eixão Sul – Brasília/DF

Fonte: Correio Braziliense (2018).

Visto esses casos, foi notada a negligência aliada à ausência de inspeção e manutenção das OAEs pelos órgãos competentes, que infelizmente definem a vida útil dessas estruturas e a segurança de seus usuários.

2.2. INSPEÇÃO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

A inspeção de OAE constitui uma atividade técnica especializada de conservação destas estruturas que abrange a coleta de elementos gerais e o exame minucioso, a elaboração de relatórios, a avaliação do estado da OAE e as recomendações, as obras de manutenção, de obras de recuperação, de obras reforço ou de reabilitação (DNIT, 2016).

De acordo com o DNIT (2016) os tipos de inspeção podem ser cadastral, rotineira, extraordinária, especiais e intermediárias. As inspeções em OAEs recomendadas pelo DNIT (2016) envolvem: inspeções cadastrais, que devem ser realizadas após a imediata conclusão da obra, quando se inclui a obra no SGO ou quando ela foi submetida a importantes alterações; inspeções rotineiras, que devem ocorrer a cada dois anos; inspeções especiais devem ser realizadas a cada cinco anos; inspeções extraordinárias, que devem ocorrer quando houver um acidente grave na obra; e as inspeções intermediárias, que devem ocorrer em certas obras quando recomendado por inspeções anteriores.

2.3. MANUTENÇÃO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

A manutenção de OAEs envolve um conjunto de operações que garantem a integridade, a preservação estrutural e evita despesas maiores com processos de reabilitação ou construção. A corrosão ou deterioração do concreto influenciados por fatores como a umidade e outras condições ambientais poder ser reduzidos com a manutenção da obra. As ineficiências geométricas ou para o tipo de tráfego, que exerce um carregamento móvel sobre a estrutura, são casos que não são solucionados com manutenção e requerem monitoramento dos limites de carga (DNIT, 2016).

O DNIT (2016) classifica as atividades de manutenção como programada ou rotineira e manutenção corretiva. A manutenção programada ou rotineira origina-se de observações de defeitos toleráveis para preservar os componentes da ponte e pode ser solucionada baseando-se numa lista de tarefas e especificações. A manutenção corretiva baseia-se em atividades específicas de intervenções menores identificadas na inspeção como pintura, remoção de detritos, recomposição e selagem de juntas de dilatação etc.

2.4. MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS

Desde o século XIX, há registros de emprego de novas metodologias de construção de obras civis que evidenciam a preocupação em relação à integridade e o comportamento estrutural. Mufti (2001) apresentou um teste de processo de investigação da integridade estrutural de uma ponte de treliça metálica, que foi desenvolvida na Inglaterra. A Figura 6 apresenta o teste de monitoramento realizado na ponte de treliça metálica, século XIX.

Figura 6: Teste de monitoramento realizado na ponte de treliça metálica, século XIX

Fonte: MUFTI (2001).

De acordo com Assis (2007) monitorar uma estrutura pode colaborar para garantir a sua integridade a partir da aquisição dos dados de seu comportamento dinâmico. O monitoramento de estruturas engloba a medição, a aquisição, o tratamento dos dados, a avaliação e os registros digitais dos componentes da estrutura.

A necessidade do monitoramento estrutural pode ser justificada pelos avanços tecnológicos, a degradação, a inspeção e acompanhamento do comportamento da estrutura. No término da análise do monitoramento, a estrutura pode ser liberada ou restringida para o uso. Com isso, propostas de reforços estruturais ou substituição da estrutura podem ser executadas.

As técnicas de monitoramento das oscilações dinâmicas de uma estrutura podem ser divididas em curta e longa duração. O monitoramento de curta duração se enquadra num período de levantamento de horas e dias, e o monitoramento de longa duração ou *Structural Health Monitoring* (SHM) pode ter um período de meses ou até mesmo anos. O SHM compreende a integração de vários dispositivos como sensores de aquisição dos dados, o processamento dos dados, a modelagem, a filtragem dos dados e os métodos de análise de dados.

Segundo Farhey (2005), a qualidade do monitoramento é determinada pelo desempenho dos sensores que compõem um sistema de monitoramento. A instrumentação e os procedimentos de instalação dos sensores na estrutura mesmo estando consolidados ainda existem alguns problemas de limitação sejam elas técnicas ou tecnológicas. Certos aspectos devem ser considerados como (FARHEY, 2005):

- Faixa de medida: determinada com base nas pré-avaliações das deformações estruturais, que devem estar dentro da precisão dos sensores;
- Comprimento da medida: os valores de comprimento a ser medido devem ser realizados com base na distribuição dos esforços locais da estrutura. São recomendados valores na ordem de 20 cm para concreto armado e protendido;
- Rigidez: a rigidez do sensor é diretamente relacionada com o material da estrutura a ser verificado, caso o material da estrutura possua rigidez inferior ao sensor há riscos de alterar o comportamento estrutural;
- Acoplamento: a qualidade e a precisão das medidas são controladas pela forma em que o sensor é instalado no ponto de interesse. A fixação dos sensores deve ocorrer de forma que não afete a integridade estrutural;
- Instalação interna: em um monitoramento de longa duração em concreto armado, protendido ou asfáltico recomenda-se instalar os sensores dentro do material para proteger os sensores e reduzir a sua vulnerabilidade;
- Defeitos nos sensores: ao instalar os sensores na estrutura deve-se considerar a possibilidade de problemas de falha e mau funcionamento. Os dados obtidos pelos sensores devem apresentar redundância a fim da ocorrência de um mau funcionamento;
- Calibração: na aquisição dos dados recomenda-se a retirada de algum sensor para calibração. Muitos sensores demandam de uma calibração periódica. Devido a este fato não são recomendados para um sistema de monitoramento pelo alto custo e descontinuidade do processo de monitoramento;
- Desempenho em longo prazo: ao utilizar sensores em monitoramentos de longos prazos recomenda-se a verificação e validação do desempenho dos sensores em longo prazo.

Na realização de um monitoramento devem-se escolher as grandezas a serem medidas em campo como deslocamentos, acelerações, oscilações, efeitos ambientais etc. A escolha

dessas grandezas é diretamente relacionada com a análise de um problema, o monitoramento ou o levantamento do comportamento dinâmico da estrutura.

Assis (2007) tratou o deslocamento de uma estrutura como a transformação de sua geometria, geralmente pela incidência de algum carregamento ou influências do meio como a temperatura, vento. O deslocamento é medido em relação a um referencial fixo, realizado antes e depois à presença de um carregamento para que seja possível verificar a deflexão e, conseqüentemente, a alteração da geometria da estrutura.

Os tipos de sensores influenciam de forma direta a qualidade do monitoramento. Normalmente o monitoramento é realizado a partir de equipamentos convencionais como extensômetros, transdutores de deslocamento, sismômetros, inclinômetros e acelerômetros, ou a partir de equipamentos topográficos e/ou geodésicos.

Os equipamentos convencionais, normalmente utilizados no monitoramento estrutural, possibilitam obter resultados confiáveis do comportamento dinâmico de uma estrutura, porém demandam de uma equipe especializada para a sua instalação, proteção, calibração e manutenção. No entanto, os equipamentos topográficos e/ou geodésicos não necessitam do deslocamento de uma equipe especializada, permitem trabalhar em diferentes condições climáticas, não necessitam de calibração e possibilitam obter respostas estruturais de precisão condizentes com as técnicas convencionais de monitoramento.

3. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE - O USO DE RECEPTORES GPS NO MONITORAMENTO DE PONTES

3.1. O USO DA TECNOLOGIA GPS NA INSPEÇÃO DE OBRAS DE ARTE VIÁRIAS

Neste capítulo foram apresentados trabalhos relacionados ao uso da tecnologia GPS no monitoramento da infraestrutura viária, notadamente de obras de arte viária de concreto. Adicionalmente, abordaram-se as técnicas de filtragem de sinais GPS utilizadas para tratamento dos dados e a identificação de informações sobre resposta estrutural das obras de arte viárias. A revisão bibliográfica foi concentrada no uso do GPS como instrumento para descrição do comportamento de tabuleiro das OAEs sob a ação carga dinâmica. Neste caso, a partir dos dados de GPS tratados com filtragem tornou-se possível identificar os modos de vibração do tabuleiro e a sua amplitude de deslocamento (deflexão vertical).

3.2. O USO DA TECNOLOGIA GNSS NA INSPEÇÃO DE OBRAS DE ARTE VIÁRIAS E OUTRAS ESTRUTURAS

Anteriormente à apresentação de trabalhos e pesquisas publicadas, que corroboram o uso do GPS no monitoramento de obras de arte viárias, torna-se importante mencionar que desde o início da década de 1980, até os dias de hoje, vários estudos de monitoramento de estruturas com o apoio do GPS foram registrados. Dentre estes estudos cita-se o monitoramento de deslocamentos em gasodutos por meio de GPS (McLELLAN, PORTER e PRICE, 1989), a modelagem e o uso da tecnologia GPS integrado às técnicas de nivelamento para monitoramento de subsidência de terra (CHRZANOWSKI *et al.*, 1988; CHRZANOWSKI, CHEN e LEAL, 1990) e o monitoramento da torre de Calgary no Canadá a partir de receptores GPS (LOVSE *et al.*, 1995).

Mais recentemente, a partir do ano 2000, existem publicações de diversas pesquisas nas quais o GPS foi usado no monitoramento de pontes suspensas (ROBERTS, MENG e DODSON; 2001; MENG, DODSON e ROBERTS, 2007; SUN, ZOU e ZHANG, 2017), pontes estaiadas (LAROCCA, 2004; YU, GUO e CHENGWU, 2006; KALOOP e LI, 2009; YI, LI e GU, 2013; WANG e DING, 2014; LEPADATU e TIBERIUS, 2014; VAN LE e NISHIO, 2015; CASCIATI *et al.*, 2017; SUN, ZOU e ZHANG, 2017) e de pontes de concreto (ARAÚJO

NETO *et al.*, 2013; LAROCCA *et al.*, 2014; LAROCCA *et al.*, 2015; KALOOP, ELBELTAGI e ELNABWY, 2015; LAROCCA *et al.*, 2016; VAZQUEZ *et al.*, 2017).

Outros estudos apresentaram a aplicação da tecnologia GPS em monitoramento de passarelas (MOSCHAS e STIROS, 2015), torres (BAO *et al.*, 2018), barragens (MONTILLET *et al.*, 2016) e de terremotos (STIROS e MOSCHAS, 2014; MOSCHAS *et al.*, 2014; PSIMOULIS *et al.*, 2015; MONTILLET *et al.*, 2016), a partir da aplicação de diferentes métodos de posicionamento.

Já a partir de 2015, alguns autores começaram a utilizar o GPS no monitoramento de obras de arte viárias de concreto com vão de até 30 metros, que por apresentarem amplitudes de vibração na ordem de poucos milímetros – se comparadas com as amplitudes de vibração dos tabuleiros das pontes suspensas e as pontes estaiadas, apresentam maior dificuldade de detecção com receptores GPS. Em 2015, Larocca *et al.* monitoraram o comportamento dinâmico de uma ponte de concreto com vão de 30 m por meio de sensores convencionais de inspeção estrutural e de receptores GPS de 100 Hz. Os autores concluíram que receptores de GPS de 100 Hz e tratamento de dados permitiram identificar as frequências das deflexões verticais milimétricas deste tipo de estrutura inclusive confrontando os valores obtidos com acelerômetros.

3.3. O USO DA TECNOLOGIA GNSS NA INSPEÇÃO DE PONTES SUSPENSAS E ESTAIADAS

Os primeiros estudos de monitoramento de pontes suspensas e estaiadas a partir da tecnologia GPS deram-se início a partir dos anos 2000. Citou-se como exemplo o monitoramento de uma ponte suspensa em Nottingham, na Inglaterra, em que foram utilizados receptores GPS de dupla frequência, com taxa de amostragem de 10 Hz, em conjunto com acelerômetros triaxiais para avaliar deslocamentos verticais da ponte (ROBERTS, MENG e DODSON, 2001).

Meng, Dodson e Roberts (2007), realizaram um estudo para avaliar as frequências naturais de uma passarela suspensa em Nottingham. Os autores integraram receptores GPS a acelerômetros triaxiais, para obterem os valores de comportamento dinâmico da estrutura, e compararam com valores obtidos a partir do Método de Elementos Finitos (MEF). A passarela estava sobre solicitação do tráfego de 30 pessoas. A tecnologia GPS mostrou ser capaz de identificar o comportamento dinâmico da estrutura, validada pelas medições de acelerômetros.

Yu, Guo e Chengwu (2006) realizaram um estudo de inspeção de uma ponte estaiada localizada na China com receptores GPS. Os autores utilizaram Wavelet para identificar os ruídos do sinal da fase da onda portadora e o comportamento dinâmico da ponte por meio das coordenadas (X, Y e Z) e, com isso, identificar as frequências da ponte a partir da FFT. A tecnologia GPS mostrou ser eficaz para caracterizar as baixas frequências de vibração da ponte estaiada de grande porte em suas três direções.

A ponte estaiada Tianjin Yonghe na China foi monitorada por Kaloop e Li (2009). Os autores utilizaram no monitoramento desta estrutura receptores GPS em modo *Real Time Kinematic* (RTK), com uma taxa de coleta de 20 Hz. Também foram coletados dados de tráfego de veículos sobre a ponte e dados atmosféricos. Neste estudo os autores concluíram que, a variável que mais comprometia a estrutura da ponte era o carregamento móvel gerado pelo tráfego veicular.

Receptores GPS com taxas de amostragem de 50 e 100 Hz foram avaliados em monitoramento de pontes, por Yi, Li e Gu (2013). Experimentos foram realizados para avaliar a potencialidade dos receptores de alta taxa de frequência. Um deles foi realizado no tabuleiro da ponte Dalian BeiDa, na China, que estava sobre solicitação do tráfego local no momento da coleta dos dados. Os autores utilizaram o filtro Wavelet para o tratamento dos ruídos que afetam o sinal de GPS. Os dados dos receptores de 50 e 100 Hz mostraram-se capazes de identificar altas frequências e a acurácia foi compatível aos dados de acelerômetros. Os resultados foram condizentes com os valores preditos por meio do Método de Elementos Finitos e permitiram identificar deslocamentos induzidos por fatores ambientais como vento, variação da temperatura, terremotos etc, e pelo tráfego de veículos sobre o tabuleiro da ponte. Isso confirma que os receptores GPS foram ferramentas de grande eficiência para obter respostas dinâmicas provocadas pelo carregamento móvel de veículos.

Lepadatu e Tiberius (2014) monitoraram a ponte estaiada Basarab em Bucareste, na Romênia, com vão principal de 165 m, para avaliar os carregamentos estáticos, com receptores GPS de 1 Hz no modo de posicionamento relativo estático e dinâmicos com receptores GPS de 20 Hz no modo de posicionamento relativo cinemático. Os resultados foram validados meio de resultados de Método de Elementos Finitos (MEF) e de acelerômetros. Os métodos de análise das diversas frequências harmônicas incluíram a FFT. A discrepância máxima entre os sensores GPS e acelerômetros foi cerca de 7%. A frequência natural da estrutura registrada estava entre 11 e 12 Hz. Com isso, recomendaram o uso de receptores com taxas de frequências superiores a 20 Hz para a detecção das frequências da ponte.

Van Le e Nishio (2015) avaliaram dados de receptores GPS instalados no vão central de 550 m e nas torres de 171 m da ponte estaiada Can Tho, no Vietnã. Os receptores *rover* foram configurados no modo RTK, a uma taxa de amostragem de 20 Hz e um período de amostragem de 10 min cada. Os modelos autorregressivo integrado de médias móveis (ARIMA) e autorregressivo de médias móveis (ARMA) foram utilizados e mostraram-se úteis na avaliação dos deslocamentos globais de uma estrutura. Os dados de GPS possuem alta correlação com os dados de temperatura do ar e permitiram obter com precisão os deslocamentos significativos das torres e do vão central.

Han *et al.* (2016) apresentaram um sistema integrado com receptores GPS de 10 Hz no modo RTK, sete acelerômetros e três anemômetros para obter as respostas de uma ponte longa *Erqi Yangtze River* em Wuhan, na China, sobre influência de carga gerada pelo vento. A análise espectral foi realizada por meio de um algoritmo FFT para detectar as frequências modais do pilar central. A filtragem foi realizada pelo filtro Vondrak (Zheng *et al.*, 2005) e separadas as baixas frequências. A reconstrução dos deslocamentos foi realizada pelo método dos mínimos quadrados. Os resultados mostraram que o sistema integrado pode melhorar significativamente a compreensão dos deslocamentos da estrutura.

Sun, Zou e Zhang (2017) apresentaram a aplicação de um sistema de monitoramento em pontes longas na China. Três estudos de caso foram apresentados. Caso 1: incidente da colisão de um navio na suspensão da ponte Jiangyin, na China. Esta ponte possui 5 receptores GPS de 1 Hz, transdutores de deslocamento de 20 Hz sensores de temperatura. Caso 2: danos de juntas de expansão da ponte Jiangyin. Caso 3: amortecedores de massa ajustados em uma ponte de viga de aço na ponte Chongqi, na China. Os resultados dos três estudos de caso confirmaram os benefícios de um sistema de monitoramento integrado.

3.4. O USO DA TECNOLOGIA GNSS NA INSPEÇÃO DE PONTES DE CONCRETO ARMADO

Os estudos da aplicação de GPS na inspeção de pontes de concreto são recentes e poucas pesquisas estão publicadas. Citam-se os estudos de Kaloop, Elbeltagi e Elnabwy (2015), Larocca *et al.* (2016) e Vazquez *et al.* (2017), que monitoraram pontes de concreto de diferentes dimensões, a partir de receptores com taxas de amostragem distintas. Os autores utilizaram métodos distintos para a obtenção e avaliação das frequências dos deslocamentos destas pontes, que estavam sobre carregamento do tráfego veicular.

Kaloop, Elbeltagi e Elnabwy (2015) realizaram o monitoramento do vão central de 80 m da ponte Mansoura, na cidade de El-Mansoura, no Egito. Este monitoramento foi realizado a partir de receptores GPS de 1 Hz em modo RTK. A ponte estava sobre carregamento do tráfego de veículos. As séries temporais de GPS foram avaliadas por meio da Análise de Componentes Principais Wavelet (ACPW), que permitiu suavizar os ruídos. O efeito do multicaminhamento e o ruído do receptor foram as principais fontes de erros. Os deslocamentos máximos do tabuleiro da ponte foram de 2,0 cm e 1,7 cm em X e Y, respectivamente, e uma frequência de vibração de 0,02 Hz, com um nível de confiança de 95 %.

Larocca *et al.* (2016) realizaram o monitoramento do comportamento dinâmico do vão central de 30 m de uma ponte concreto armado com GPS de 100 Hz, por meio do Método do Resíduo de Fase (MRF). A ponte de estudo está localizada na BR 381, km 946, em Minas Gerais. Este tipo de ponte é amplamente encontrado em toda a malha viária do território brasileiro. A fase da onda portadora L_1 foi considerada e o método da dupla diferença de fase foi aplicado na obtenção dos resíduos. O método de posicionamento foi o relativo estático. Os dados foram coletados durante o tempo de 5 minutos sem interrupção do tráfego. A análise espectral foi realizada por meio da Transformada Wavelet Contínua (*Continuous Wavelet Transform*). As respostas espectrais mostraram que as frequências da ponte estavam entre 4 e 8 Hz, sobre a ação do tráfego normal, e um deslocamento vertical pico-a-pico da ordem de 5 mm. Estes valores foram confrontados com a instrumentação convencional por transdutores de deslocamentos e acelerômetros, e os resultados foram similares. Isso mostrou que, o MRF foi capaz de detectar as informações sobre comportamento dinâmico do tabuleiro. Os dados coletados na ocasião foram utilizados neste trabalho.

Vazquez *et al.* (2017) monitoraram o vão central de 20 m da ponte Juarez em Culiacán, no México, por meio de receptores GPS de 1 Hz e coletaram dados em três períodos do dia, em que a ponte estaria sob carga crítica do tráfego. As séries temporais de GPS foram utilizadas para o cálculo de deslocamento dinâmico. A filtragem das séries temporais de GPS foi realizada pelos filtros de média móvel e passa-alta Chebyshev de Tipo I. Os resultados mostraram valores críticos de deslocamento vertical. Os valores foram comparados com os limites de deflexão da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e a calculada a probabilidade de falha da estrutura. O filtro Chebyshev do tipo I mostrou-se adequado para os deslocamentos dinâmicos, que variaram entre 1,1 cm e 25 cm.

3.5. FILTRAGEM DE SINAIS DE GPS

Sinais de GPS sofrem reflexões e refrações atmosféricas que geram ruído conhecido como multicaminhamento dos sinais da fase da onda L_1/L_2 (LEICK, 2004). Este ruído pode comprometer a qualidade das observações e mitigar ou mascarar completamente a detecção de fenômenos periódicos (ou não), que ocorrem nos tabuleiros de pontes, por exemplo (MENG, DODSON e ROBERTS, 2007; LAROCCA et al., 2016). De acordo com Lovse *et al.* (1995), para a detecção de deflexões verticais de estruturas o efeito do multicaminhamento pode se tornar fonte de erro dominante em períodos de amostragem curtos, de 1 a 5 minutos. O modo diferencial e o uso de antenas *choke ring* podem reduzir a refração dos sinais e consequentemente os ruídos causados pelo multicaminhamento de alta frequência do sinal GPS (LEICK, 2004; LAROCCA, 2004).

Os ruídos de sinais GPS podem ser tratados por meio de variados filtros, tais como a *Fast Fourier Transform* (FFT) (LEPADATU e TIBERIUS, 2014; MOSCHAS e STIROS, 2014; WANG *et al.*, 2016; HAN *et al.*, 2016; YIGIT e GURLEK, 2017), Wavelet (KALOOP e LI, 2014; KALOOP, HU e SAYED, 2015; KALOOP, ELBELTAGI e ELNABWY, 2015; LAROCCA *et al.*, 2016, WANG *et al.*, 2017), Chebyshev (MOSCHAS e STIROS, 2015; WANG *et al.*, 2016; VAZQUEZ *et al.*, 2017; XIONG, LU e ZHU, 2017), Média Móvel (VAN LE e NISHIO, 2015; VAZQUEZ *et al.*, 2017), Redes Neurais (KALOOP e HU, 2015) e filtro Vondrak (HAN *et al.*, 2016).

Estas técnicas de filtragem aliadas aos métodos de posicionamento com o sistema GPS – posicionamento diferencial em modo RTK, relativo estático, relativo estático-rápido, semi-cinemático, cinemático e Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) – e aos receptores GNSS de diferentes taxas de amostragem de 1 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz e 100 Hz, têm sido utilizados em monitoramento estático e dinâmico de estruturas e apresentado eficiência em seus resultados – a grande maioria em pontes com grandes vãos, como as suspensas e as estaiadas.

Kaloop e Li (2014) realizaram um monitoramento em tempo real na ponte Yonghe, na China, para detectar os movimentos da torre da ponte, por meio de receptores GPS de 20 Hz no modo posicionamento RTK. Modelos de regressão múltipla robusta de ajuste de entrada-saída e de *Neural Network Auto-Regressive Moving Average* (NNARMAX) foram desenvolvidos para a análise. O tratamento do sinal com a Wavelet Daubachies40 de nível 16 aumentou a precisão dos dados em 24%. Os modelos identificaram os efeitos da carga móvel aplicada sobre a ponte e os deslocamentos da torre com precisão milimétrica. A variável de maior influência

foi o tráfego de veículos e suas respectivas cargas. Porém as variáveis umidade e temperatura mostraram-se insignificantes na análise.

Wang e Ding (2014) modelaram o deslocamento lateral induzido pela velocidade do vento na ponte estaiada Sutong, na China, a partir de dados de GPS de 1 Hz e de anemômetros ultrassônicos de um sistema de monitoramento de saúde estrutural, instalados na viga principal da ponte. As séries temporais registradas com GPS foram descritas a partir de séries de Fourier e as séries gaussianas integraram a velocidade lateral do vento por meio de modelos combinados. Os modelos apresentaram eficiência para detectar o deslocamento lateral da viga principal da ponte a partir de dados GPS e de velocidade do vento, em tempo real.

Wrona e Nykiel (2014) realizaram medições de deslocamentos com um sistema de monitoramento estrutural em tempo real. Este sistema era composto de receptores GNSS de 10 e 20 Hz, no modo RTK, e de diferentes sensores. O primeiro teste foi realizado em uma ponte em Zakroczym, na Polônia, sobre tráfego normal. Uma câmara foi instalada próxima do sistema de monitoramento para relacionar o tipo do veículo com os deslocamentos ocasionados. O filtro de Kalman foi utilizado para tratar séries temporais de GNSS e calcular os deslocamentos. O outro experimento foi realizado em uma ponte militar temporária e confirmou a eficiência do uso do GNSS para obter informações do comportamento dinâmico da estrutura em tempo real. O estudo permitiu detectar caminhões com sobrecarga.

Moschas e Stiros (2015) avaliaram o uso de receptores GNSS de 100 Hz no monitoramento de uma passarela rígida em Patras, na Grécia, sob presença de pedestres e comparou-se com resultados de acelerômetros de 100 Hz. Os deslocamentos verticais aparentes foram calculados pelo código Normperiod e seguiu o critério de Nyquist. As séries temporais foram filtradas por meio do filtro Chebyshev do Tipo I de ordem 8 com o filtro passa-banda na faixa das frequências 6-7 Hz. Os dados de GNSS e de acelerômetros permitiram obter resultados para as deflexões verticais. A partir disso, os autores conseguiram utilizar o equipamento GNSS para monitoramento de tabuleiro de pontes rígidas, que possuem frequências naturais na ordem de 6 Hz e deflexões milimétricas.

Kalooop e Hu (2015) avaliaram modelos de redes neurais para melhorar os resultados de monitoramento de estruturas por meio de dados de GPS. Quatro modelos foram analisados: *Back-Propagation Network* (BPN), *Cascade Back-Propagation* (CFN), *Adaptive Filter Network* (ADFN) e *Extended Kalman Filter Network* (EKFN) e os resultados foram comparados. Com isso, o modelo ADFN permitiu obter os deslocamentos em um curto período de tempo a partir de dados de GPS no modo RTK, na ponte Zhujiang Huangpu, localizada na China. Este modelo aumentou a precisão dos deslocamentos nas três direções (X, Y e Z). Os

valores das frequências estavam entre 0 e 0,2 Hz. As medidas de GPS com taxa de amostragem de 1 Hz podem subestimar a amplitude das componentes de deslocamento. Isso pode ser superado a partir do uso de receptores GPS de alta frequência.

Kaloop, Hu e Sayed (2015) realizaram um monitoramento em longo prazo na ponte Huangpu em Guangzhou, na China, por meio de GPS de 1 Hz no modo RTK. Os autores projetaram um modelo genético: *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) e aplicaram a transformada Wavelet para a filtragem de ruídos das séries temporais de GPS. Os resultados da transformada Wavelet foram satisfatórios, pois mantiveram a consistência da precisão nas medidas. Os resultados de deformação estrutural a partir do modelo ANFIS permitiram apresentar deslocamentos estáticos e semi-estáticos pequenos e frequências aproximadamente constantes.

Casciati *et al.* (2017) propuseram a fusão de respostas múltiplas pelo filtro de Kalman para refinar a estimativa dos deslocamentos obtidos por meio de receptores GPS. O método proposto foi validado em uma passarela de madeira localizada em Farra d'Alpago, na Itália. Dois receptores GPS de 20 Hz e um acelerômetro triaxial de 1000 Hz foram utilizados no monitoramento. A fusão dos dados de GPS com os dados de acelerômetro permitiu obter de forma precisa os deslocamentos da estrutura monitorada sob excitações externas significativas, a partir do filtro de Kalman.

O tamanho dos vãos das OAEs influenciou diretamente no comportamento dinâmico da estrutura. O método proposto de avaliação do comportamento dinâmico vertical de curta duração de ponte rígida de concreto armado a partir da filtragem de sinais de GPS apresentou grande potencial, permitiu agilidade na obtenção das respostas dinâmicas da estrutura e valores condizentes aos obtidos por meio de instrumentação convencional.

O tratamento dos resíduos, neste trabalho, foi realizado por meio de alguns dos filtros digitais mencionados anteriormente e possibilitam extrair informações referentes às respostas do tabuleiro da ponte - oscilações periódicas verticais— devido ao fluxo do tráfego de automóveis. As respostas estruturais estudadas foram às frequências e as amplitudes de oscilação. Desta forma, a seguir foram descritos os seguintes filtros digitais: FFT, CWT, Chebyshev e Passa-Faixa. Estes filtros foram programados em MATLAB R2015a.

3.5.1. Filtragem com FFT

O filtro *Fast Fourier Transform* (FFT) permite decompor sinais analógicos ou digitais em componentes de senos e cossenos por meio das características das frequências

(MORETTIN, 2014). Porém, no estudo de dados não estacionários a FFT se torna limitada para determinar as variações de baixas e altas frequências simultaneamente, porque possui uma janela fixa no tempo (GABOR, 1946; PAPOULIS, 1962; BUTKOV, 1968; BOLZAN, 2006; BARBOSA e BLITZKOW, 2014; MORETTIN, 2014).

A FFT se trata de um algoritmo eficiente para o processamento computacional de sinais, durante um período de tempo ou um espaço, e os divide em componentes de frequência. O processamento computacional é mais rápido, pois o número de operações de multiplicações complexas cai para $2 \cdot N \cdot \log_2 N$, isto causa uma redução significativa no tempo de processamento.

Este filtro possibilita identificar e relacionar os picos de energia com suas respectivas frequências, com diferentes intensidades de energia (MORETTIN, 2014), permite descrever as frequências que podem corresponder um carregamento sobre uma estrutura e as que correspondem aos ruídos do ambiente, como o multicaminhamento de baixa e alta frequência do sinal GPS (LAROCCA, 2004).

O tratamento dos resíduos em FFT utilizou o modelo matemático da FFT definido pela Equação 1:

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi nm}{N}\right) \right) \quad (1)$$

em que:

- $X[m]$ - sinal;
- m - operador de ordem harmônica; em que $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ e a partir de $m = \frac{N}{2}$ o sinal se repete;
- n - contador de amostras do sinal $x[n]$; em que $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$;
- N - número de amostras;
- j - unidade imaginária; em que: $j = \sqrt{-1}$.

3.5.2. Filtragem com CWT

A origem das funções Wavelets foi registrada por volta de 1930. Na década de 80, Jean Morlet e Alex Grossman constituíram uma base de estudo de sinais por meio da Transformada *Wavelet* com a introdução da *Wavelet*-mãe de Morlet e Grossman para a análise e tratamento

de sinais não estacionários nos domínios da frequência e tempo (MORLET, 1983; DAUBECHIES *et al.*, 1992; MEYER, 1993; MALLAT, 1999; PROTÁZIO, 2002; ANTOINE *et al.*, 2008; ROCHA, 2008; LIU, 2010; BARBOSA e BLITZKOW, 2014). A Transformada Wavelet Contínua ou *Continuous Wavelet Transform* (CWT) é por definição um operador linear que satisfaz as relações de superposição linear, transposição e escalonamento da função Wavelet-mãe (CHUI, 1992; MALLAT, 1999; ANTOINE *et al.*, 2008).

O filtro CWT permite tratar sinais não estacionários, o que o diferencia do filtro FFT, identificar e decompor as energias do sinal em período-frequência-espço, assim como observar as influências ruidosas do meio sobre os dados, ou seja, possui janelas móveis no tempo e no espaço que se ajustam aos sinais de baixas e altas frequências (MORLET, 1983; DAUBECHIES *et al.*, 1992; MEYER, 1993; MALLAT, 1999; ANTOINE *et al.*, 2008; MORETTIN, 2014; BARBOSA e BLITZKOW, 2014). A função Wavelet Contínua de Morlet mostrou-se eficaz para a filtragem de dados GPS, pois permitiu decompor os resíduos do sinal em frequências no intervalo estabelecido.

O tratamento foi executado a partir dos resíduos da fase da onda portadora L_1 , coletados pelo GPS Javad de 100 Hz e utilizada a CWT, a mesma utilizada por Araújo Neto *et al.* (2013), Larocca *et al.* (2014), Larocca *et al.* (2015), Larocca *et al.* (2016) e Araújo Neto (2017). A CWT foi apresentada conforme a Equação 2:

$$CWT_x(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int (x(t) \cdot (\psi \cdot \left(\frac{t-\tau}{s}\right))) dt \quad (2)$$

em que:

- τ - localização da janela que se move sobre o sinal por translação;
- s - escala do grau de expansão e informações da frequência;
- $\psi \cdot \left(\frac{t-\tau}{s}\right)$ - Wavelet mãe original que representa a translação e dilatação em todas as frequências e janelas.

O processamento dos dados por meio do código de CWT possibilitou a geração de dois gráficos importantes para a análise de deflexão vertical de uma estrutura: um apresentou os resíduos e o outro retratou o *Wavelet Power Spectrum* (WPS), com um cone de influência a um nível de confiança de 95%.

O WPS permitiu identificar as frequências por meio da concentração de energia e relacioná-las ao período de ocorrência. O eixo das abscissas mostra a taxa de amostragem em centésimos de segundos e o eixo das ordenadas mostra a frequência em Hertz (Hz).

3.5.3. Filtragem com Chebyshev

Os filtros Chebyshev pertencem à classe de filtros de Resposta Infinita ao Impulso ou *Infinite Impulse Response* (IIR), que permite solucionar problemas não periódicos a partir de seus polinômios ortogonais. Normalmente estes polinômios atendem um conjunto de restrições com uma ordem pequena. Esses filtros podem ser analógicos ou digitais e se dividem em dois tipos: Chebyshev do Tipo I e Chebyshev do Tipo II (TAKEUCHI *et al.*, 2004; SHENOI, 2005).

O filtro Chebyshev do Tipo I provoca uma ondulação de mesma amplitude (*equiripple*) na banda passante e suaviza a banda de rejeição. Esse fato mostrou-se interessante para a análise modal do comportamento dinâmico de uma estrutura, pois permitiu enaltecer as frequências de interesse e desconsiderar as demais. Porém, o filtro Chebyshev do Tipo II provoca ondulação de mesma amplitude na banda de rejeição e suaviza a banda passante.

Este filtro considerou a frequência normalizada, com isso as frequências na borda de passagem devem se situar dentro do intervalo 0 e 1. O número 1 corresponde à metade do valor da taxa de amostragem, respeitando assim o Teorema de Nyquist (NYQUIST, 1928, SHENOI, 2005), conforme é definido pela Equação 3:

$$F_{Nyquist} = \frac{f_{amostragem}}{2} \quad (3)$$

A ordem do filtro determinou o nível de aproximação do sinal filtrado com o sinal real, quanto maior a ordem maior a aproximação do sinal filtrado com o sinal real. O filtro Chebyshev de ordem n foi definido pela Equação (4):

$$C_n(\Omega) = \begin{cases} \cos \left(n \cdot \cos^{-1} \Omega \right) & |\Omega| \leq 1 \\ \cosh \left(n \cdot \cosh^{-1} \Omega \right) & |\Omega| > 1 \end{cases} \quad (4)$$

em que:

- $C_n(\Omega)$ - polinômio de Chebyshev de ordem n ;
- Ω - frequência normalizada (Equação 5).

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_p} \quad (5)$$

em que:

- ω - frequência real;
- ω_p - frequência de passagem.

Um filtro Passa-Faixa foi programado junto ao filtro Chebyshev do Tipo I para apresentar as informações do comportamento dinâmico da estrutura dos diversos ruídos inerentes ao sistema GPS. Ademais permitiu representar as frequências fundamentais na maioria das estruturas de engenharia, que se situam acima de 0,1 Hz, quando utilizados em dados de receptores com alta taxa de amostragem, (BACHMANN, 1997; MENG, 2002; MOSCHAS e STIROS, 2014; MOSCHAS e STIROS, 2015; XIONG, LU e ZHU, 2017).

O filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I tem n ordens e no trabalho foi utilizada a de ordem 8. A ordem 8 apresentou uma forte atenuação do sinal na banda de rejeição e melhorou a qualidade do sinal, que elimina o erro causado pelo efeito do multicaminhamento do sinal, conforme apresentado na literatura por Moschas e Stiros (2014), Vazquez *et al.* (2017) e Xiong, Lu e Zhu (2017). A Equação 6 apresenta a sequência polinomial de Chebyshev até a ordem 8, em que $\Omega = x$:

$$\begin{aligned} C_0(x) &= 1 \\ C_1(x) &= x \\ C_2(x) &= 2x^2 - 1 \\ C_3(x) &= 4x^3 - 3x \\ C_4(x) &= 8x^4 - 8x^2 + 1 \\ C_5(x) &= 16x^5 - 20x^3 + 5x \\ C_6(x) &= 32x^6 - 48x^4 + 18x^2 - 1 \\ C_7(x) &= 64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x \\ C_8(x) &= 128x^8 - 256x^6 + 160x^4 - 32x^2 + 1 \end{aligned} \quad (6)$$

Dados originados de equipamentos com alta taxa de amostragem como, por exemplo, dados de GPS de 100 Hz, normalmente são ruidosos em todas as faixas (bandas) das frequências (MOSCHAS e STIROS, 2014; MOSCHAS e STIROS, 2015).

Segundo Moschas e Stiros (2014) o uso de um filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I de ordem 8 e com ondulação (*ripple*) da banda passante de 0,8 dB mostra-se adequado para dados de GPS de 100 Hz.

O código do filtro Chebyshev do Tipo I permitiu delimitar a faixa do sinal na banda passante. Com isso, este filtro facilitou a identificação das frequências e das amplitudes de deslocamento vertical de interesse. A configuração do código se assemelhou aos filtros utilizados por Meng *et al.* (2007), Moschas e Stiros (2011), Moschas e Stiros (2014), Moschas e Stiros (2015), Psimoulis *et al.* (2015), Vazquez *et al.* (2017), e Xiong, Lu e Zhu (2017).

A variação dos limites da faixa das frequências pode ser determinada conforme o comportamento da estrutura, com isso deve-se avaliar previamente os valores dos limites da faixa que encontram-se as frequências da estrutura monitorada. Neste caso, foi considerada uma faixa com limites de frequências de 0,1 Hz a 9 Hz.

3.5.4. Filtragem prévia: Filtro Passa-Faixa

Um filtro Passa-Faixa é um tipo de ferramenta que permite a passagem das frequências de uma faixa determinada pelos limites inferior e superior, e pode ser obtido a partir da combinação entre filtros Passa-Baixa e Passa-Alta. Este filtro foi programado para obter os valores de resíduos de GPS que correspondam a uma faixa de frequências que encontram-se as respostas espectrais da estrutura inspecionada.

Esta filtragem prévia dos dados a partir do filtro Passa-Faixa permitiu minimizar os efeitos dos ruídos como os efeitos do multicaminhamento do sinal de baixa e alta frequência, que influenciam o sinal da fase da onda portadora e melhorar a qualidade das respostas espectrais que demonstram o comportamento do tabuleiro da ponte Jaguari.

De acordo com Larocca, Schaal e Barbosa (2010), as baixas frequências, entre 0,05 Hz e 1 Hz, sofrem maiores interferências dos efeitos do multicaminhamento do sinal. Essas frequências são importantes para o monitoramento da saúde estrutural.

Os valores dos resíduos de GPS, que representam a banda passante, foram salvos em arquivos e filtrados novamente em FFT, CWT e Chebyshev. A configuração da faixa do filtro Chebyshev foi alterada para fins de análise.

Esse procedimento foi realizado a partir da filtragem dos resíduos brutos obtidos no levantamento realizado no tabuleiro do vão central da ponte Jaguari, para permitir identificar as frequências, que possam representar a faixa de frequências de 0,5 Hz a 25 Hz, e as deflexões verticais condizentes às respostas da estrutura sobre solicitação tráfego de veículos.

3.6. TIPOS DE RECEPTORES GNSS

Atualmente, encontram-se receptores de 50 Hz como o Leica GMX902 GNSS, o GNSS TechGeo GTR-G2 L₁/L₂, que registrar frequências entre 5 e 50 Hz, o Trimble NetR9 Ti-3, que registra frequências entre 7,5 e 50 Hz, e o receptor GNSS STONEX S10, que registra frequências de até 50 Hz. No mercado também podem ser encontrados os receptores GNSS SIGMA da Javad, GNSS Javad Triumph, GNSS Novatel ProPak-V3, GNSS Navcom Starfire 3050, e o GNSS Gr-5 da Topcon, que registram taxa de amostragem de 100 Hz.

Os receptores GNSS, sob o olhar de aplicação no monitoramento de estruturas, permitem detectar dados sobre o comportamento dinâmico de uma ponte - frequências de vibração de tabuleiros e as suas respectivas amplitudes de vibrações desde que as frequências não ultrapassem a metade da taxa de amostragem do receptor GNSS utilizado.

3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica corroborou a utilização de receptores GNSS no monitoramento de OAEs características geométricas e estruturais distintas. Foi possível realizar a revisão do emprego de receptores de diferentes taxas de amostragem na coleta das informações, aplicar diferentes métodos de posicionamento. Este trabalho avança na contribuição do uso de GPS para o monitoramento do comportamento dinâmico de pontes rígidas, através da apresentação de técnicas de filtragens dos sinais de GPS e a complementação que as mesmas proporcionam para a análise.

4. MATERIAIS E MÉTODO

Este trabalho propõe o uso de técnica geodésica para o monitoramento do comportamento dinâmico do tabuleiro da ponte instrumentada baseada no MRF e nas ferramentas de filtragem de dados. Os softwares, os equipamentos e os dados utilizados para o desenvolvimento do método estão descritos nos itens abaixo.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Apresentação do objeto de experimento: a ponte sobre o rio Jaguari

A ponte sobre o rio Jaguari foi construída em 1999 e está localizada na rodovia Fernão Dias (BR 381) próxima à divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo. Desde 2008, a rodovia está sob concessão da ARTERIS S.A. A Figura 7 apresenta a localização da ponte sobre o rio Jaguari.

Figura 7: Localização da ponte sobre o rio Jaguari

Fonte: Google Earth (2018).

A ponte possui duas faixas de tráfego em cada sentido. Esta OAE é composta por duas pontes independentes, em curva e sob desnível, sendo a não monitorada no sentido Norte (São Paulo – Belo Horizonte) e a instrumentada para monitoramento contínuo no sentido Sul (Belo

Horizonte – São Paulo), justamente por sofrer esforços laterais devido à frenagem dos veículos pesados, o que pode causar (e por isso a necessidade de monitoramento) escorregamento lateral e torção do tabuleiro em relação aos pilares de sustentação. A superestrutura, a mesoestrutura e a infraestrutura são em concreto armado. A Figura 8 apresenta um esquema da fração monitorada. Esta possui uma extensão total de 134,00 m e cinco vãos com extensões de 20,00 m, 26,00 m, 30,00 m, 26,00 m e 20,00 m (ANDRADE *et al.*, 2013; ANTT, 2015).

Figura 8: Ponte sobre o rio Jaguari

Fonte: Adaptado de ANTT (2015).

O tabuleiro central possui largura total de 11,70 m (10,90 m de pista e 0,80 m de dois guarda-rodas do tipo New-Jersey), superelevação máxima de 8%, um raio de 305,50 m, comprimento da espiral (L_s) de 80 m na curva de transição (ANDRADE *et al.*, 2013; ANTT, 2015). Segundo a ANTT (2015), a flecha máxima admitida para o vão desta OAE deve ser na ordem de 50 mm, de acordo com os critérios exigidos pela norma NBR 6118. A Figura 9 apresenta a seção transversal da ponte sobre o rio Jaguari, tipo caixão.

Figura 9: Seção transversal da ponte sobre o rio Jaguari

Fonte: ANDRADE (2012).

O tabuleiro possui revestimento de massa asfáltica em Concreto Betuminoso Usinado Quente (CBUQ) e pavimento de 6 cm de espessura. Este tabuleiro possui duas longarinas retangulares conectadas entre si. A transferência do carregamento da superestrutura para a mesoestrutura é realizado por meio de elastômeros fretados. A mesoestrutura desta OAE é composta por 12 pilares em concreto armado com comprimentos distintos devido à superelevação de sua estrutura. E a infraestrutura é composta por tubulões de 2 a 3 m de diâmetro, em concreto armado. A Figura 10 apresenta a ponte sobre o rio Jaguari, em serviço.

Figura 10: Ponte sobre o rio Jaguari

4.1.2. Caracterização do tráfego

A rodovia Fernão Dias possui uma extensão de 562,1 km e liga Belo Horizonte à São Paulo. De acordo com o relatório da ANTT (2014), o Volume Diário Médio Pedagiado Anual (VDMPA) desta rodovia foi de 201.354 veículos. A Tabela 1 apresenta a capacidade da rodovia Fernão Dias, referente ao ano de 2013 e ao trecho em que se encontra a OAE em estudo.

Tabela 1: Capacidade – Rodovia Fernão Dias

Subtrecho	km – km	Sentido	VDMA	Vol. Diário Max.	Fator K50	VHP	Capacidade unidirecional	Índice de Saturação	Nível de Serviço
MG 7	841	Sul	13.852	24.931	11,4%	1.573	4500	0,35	B
	– 950	Norte	13.971	35.761	11,7%	1.638	4500	0,36	B

Fonte: ANTT (2014)

em que (ANTT, 2014):

- VDMA – Volume Diário Médio Anual, apresentado em Unidades de Veículo Padrão (UVP)/dia;

- Vol. Diário Máx. – Volume Diário Máximo observado no período, medido em unidades de veículo padrão/dia;
- Fator K50 – razão entre o Volume unidirecional da 50ª hora de maior tráfego no ano e o VDMA;
- VHP – Volume da Hora-Pico, que corresponde Volume da 50ª hora de maior tráfego no ano, medida em unidades de veículo padrão/hora;
- Capacidade unidirecional – apresenta a capacidade de tráfego unidirecional em unidades de UVP/hora, obtida da literatura técnica e ajustados em função das diferentes configurações das características físicas dos subtrechos;
- Índice de Saturação V/C (Volume/Capacidade) – relação entre o Volume da Hora-Pico e a Capacidade. Quanto mais próximo de zero, maior disponibilidade de capacidade, quanto mais próximo de um, mais próximo da saturação está o trecho rodoviário. O V/C maior que um, significa capacidade esgotado;
- Nível de Serviço - Medida conceitual (A, B, C, D, E ou F) que define a relação entre o Volume de tráfego e a capacidade de um segmento de rodovia, geralmente medido no intervalo de uma hora. O nível A representa situação de fluxo livre; os níveis E e F representam a capacidade viária de fluxo de saturação; e o nível F representa a situação de baixa velocidade e o fluxo abaixo da capacidade, que podem inclusive cair a zero.

4.1.3. Monitoramento contínuo da ponte sobre o rio Jaguari

O monitoramento contínuo ou de longa duração, por um determinado período, da ponte sobre o rio Jaguari foi realizado a partir da integração de sensores convencionais a um sistema de coleta de dados, para a medição dos deslocamentos, oscilações, rotações e acelerações da estrutura (ANTT, 2015). Neste tipo de monitoramento foram utilizados sensores de deslocamento e de oscilações, por questões de viabilidade técnica e econômica, e fez-se necessário o uso de sistemas de proteção de descargas atmosféricas. O sistema de coleta controla, armazena e transfere os dados para um servidor, em tempo real.

O monitoramento da ponte partiu de dois sistemas de medição – rápido e lento, para medir os efeitos de acordo com suas respectivas características. O sistema de medição rápido era responsável por medir os efeitos das cargas móveis e as oscilações a partir do uso de extensômetros elétricos instalados nas armaduras, e extensômetros de ponte completa *Bridge*

Diagnostics Incorporated (BDI) instalados no concreto e transdutores de deslocamentos potenciométrico para medirem deslocamentos e abertura de fissuras nos meios dos vãos, nos apoios e vigas (ANTT, 2015). As respostas desses sensores são dadas em tensão. O sistema de medição lenta era responsável por medir os efeitos de temperatura e de degradação na estrutura por meio de corda vibrante para as armaduras e concreto *Geokon*, e transdutores de deslocamento de corda vibrante *Geokon*. Esses sensores de corda vibrante fornecem as respostas em frequência e possuem termistor para medirem a temperatura, porém possuem limitação na taxa de amostragem, com leitura de frequências de até 20 Hz (ANTT, 2015).

4.1.4. Softwares

Os dados de GPS foram pós-processados no software *Justin* da Javad, versão 2.108, a partir da ferramenta *Interferometry*, desenvolvido em parceria com a Javad. O software MATLAB R2015a foi utilizado na implementação e processamento dos dados de GPS a partir dos filtros FFT, CWT, Chebyshev e Passa-Faixa.

4.1.5. Receptores GNSS

Receptores GNSS SIGMA da Javad e antenas do tipo *choke ring* foram utilizados nos experimentos de campo. A tecnologia destes receptores foi baseada na tecnologia *Triumph*, que permite captar 216 canais nas constelações GPS, GLONASS e Galileo, ondas portadoras L_1 , L_2 e L_5 . Estes receptores foram considerados os primeiros de uso civil com taxa de amostragem de 100 Hz. Uma das principais características que o diferencia dos demais receptores é o pacote de mitigação do multicaminhamento, melhorando diretamente a possibilidade de detecção das frequências de vibração de tabuleiros de pontes, por exemplo. Este fato aliado ao uso de antenas *choke rings* permitem reduzir as interferências eletromagnéticas, que causam reflexão do sinal, a instabilidade do centro de fase da antena e o efeito do multicaminhamento sobre o sinal da fase da onda portadora (LEICK, 2004).

4.1.6. Dados da instrumentação convencional da ponte

Os dados coletados com GPS, processados e filtrados foram confrontados com os dados coletados com instrumentos convencionais instalados na ponte, por ocasião da implantação do sistema de monitoramento contínuo da ponte sobre o rio Jaguari pelo Grupo de Modelagem de

Estruturas de Concreto (GMEC), da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em colaboração com o Departamento de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) (ANTT, 2015).

Andrade (2012) realizou um monitoramento de curta duração a partir de equipamentos convencionais na ponte sobre o rio Jaguari, desenvolveu uma hierarquia de seis modelos numéricos e foi criado um plano de monitoramento de curta duração para esta ponte. Desses seis modelos, cinco modelos com comportamento linear e um com comportamento não linear. Ensaio de carga estática e dinâmica foram realizados nesse monitoramento de curta duração.

O ensaio de carga estática foi dividido em três sub-ensaios, com o fechamento da via e sem a ação do fluxo de veículos, somente com o veículo de prova – trem-tipo Classe 45 (ABNT, 1984). Os sub-ensaios de carga estática foram divididos em (ANDRADE, 2012):

1. Passagem do veículo de prova de carga pelo acostamento (Longarina B) a uma velocidade de 10 km/h e com parada média de 20 segundos sobre os vãos de 30 m, 26 m e 20 m;
2. Passagem do veículo de prova de carga pelo acostamento (Longarina A) a uma velocidade de 10 km/h e com parada média de 20 segundos sobre os vãos de 30 m, 26 m e 20 m;
3. Passagem do veículo de prova de carga pelo eixo central da ponte a uma velocidade de 10 km/h sobre os vãos de 30 m, 26 m e 20 m.

O ensaio de carga dinâmica foi dividido em três sub-ensaios, com o mesmo procedimento de fechamento da via e veículo de prova de carga. Este ensaio foi realizado com velocidade controlada no eixo do vão central da ponte. Os sub-ensaios de carga dinâmica foram divididos em (ANDRADE, 2012):

1. Passagem do veículo de prova de carga a uma velocidade de 30 km/h;
2. Passagem do veículo de prova de carga a uma velocidade de 70 km/h;
3. Passagem do veículo de prova de carga a uma velocidade de 100 km/h.

Após os ensaios realizados, os dados foram filtrados e analisados. Andrade (2012) avaliou somente os dados de deslocamento vertical das longarinas A e B da ponte referente ao ensaio estático. A Figura 11 apresenta os sinais de deslocamento vertical da longarina A e a Figura 12 apresenta os sinais de deslocamento vertical da longarina B.

Figura 11: Sinais de deslocamento vertical da longarina A

Fonte: ANDRADE (2012).

Neste ensaio estático sobre a longarina A foi possível notar deslocamentos máximos de -0,8 mm no vão de 30 m, 2,2 mm no vão de 26 m e -0,4 mm no vão de 20 m, aproximadamente.

Na Figura 12 observou-se a partir dos sinais do ensaio estático na longarina B deslocamentos máximos de 3,5 mm no vão de 30 m, 2,2 mm no vão de 26 m e -0,2 mm no vão de 20 m, aproximadamente.

Figura 12: Sinais de deslocamento vertical da longarina B

Fonte: ANDRADE (2012).

O GMEC em conjunto com o Departamento de Engenharia de Transportes (EESC/USP) realizou uma campanha de monitoramento na ponte sobre o rio Jaguari a partir do emprego de

técnicas e equipamentos convencionais de monitoramento estrutural. A medição das grandezas físicas foi realizada por meio de extensômetros elétricos, acelerômetros e transdutores de deslocamento fixados na estrutura da OAE, como mostra a Figura 13. Estes equipamentos estavam conectados a um sistema de armazenamento dos dados que permite realizar processamentos em tempo real. A frequência de amostragem foi de 100 Hz e apenas os dados dos acelerômetros foram filtrados (ANTT, 2015).

Figura 13: Localização dos transdutores de deslocamento e acelerômetros

Fonte: ANTT (2015).

O ensaio dinâmico foi realizado com um veículo de prova de carga passando sobre a ponte com velocidades de 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h e 90 km/h, sem tráfego de veículos.

A Figura 14 mostra os deslocamentos verticais medidos durante um ensaio de 30 min, em que a ponte estava sobre ação do tráfego normal de veículos. As leituras dos transdutores de deslocamento não foram realizadas no vão de 30 m (S1) devido à interferência da movimentação da água do rio Jaguari. Os valores de deslocamentos verticais máximos registrados no vão de 26 m (S2) foram de 3,04 mm e 3,15 mm, aproximadamente. Os valores de deslocamento vertical do vão de 20 m não foram apresentados neste ensaio.

Figura 14: Deslocamentos verticais medidos durante um ensaio de 30 min – tráfego normal de veículos

Fonte: ANTT (2015).

De acordo com a NBR 6118, o limite de flecha calculado para esta estrutura é de 43,3mm. Vale ressaltar que além dos deslocamentos verticais ocasionados pelo carregamento móvel de veículos, existem carregamentos secundários como a frenagem e/ou aceleração do vento sobre a estrutura da OAE (ANTT, 2015).

A análise espectral dos sinais foi realizada para estimar e verificar as frequências naturais associadas aos deslocamentos verticais da estrutura da ponte a partir dos ensaios em que o veículo de prova estava em diferentes velocidades e o tráfego normal de veículos sobre o vão de 30 m da ponte.

A Figura 15 apresenta o espectro de aceleração e as frequências desse vão da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 20 km/h.

Figura 15: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 20 km/h – vão de 30 m

Fonte: ANTT (2015).

A Figura 16 apresenta o espectro de aceleração e as frequências do vão da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 40 km/h.

Figura 16: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 40 km/h – vão de 30 m

Fonte: ANTT (2015).

A Figura 17 apresenta o espectro de aceleração e as frequências do vão da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 60 km/h.

Figura 17: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 60 km/h – vão de 30 m

Fonte: ANTT (2015)

A Figura 18 apresenta o espectro de aceleração e as frequências da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 90 km/h.

Figura 18: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o veículo de prova de carga a uma velocidade de 90 km/h – vão de 30 m

Fonte: ANTT (2015).

A Figura 19 apresenta o espectro de aceleração e as frequências da ponte com o tráfego normal de veículos sobre ao vão de 30 m da ponte. Os dados são referentes ao primeiro dia de ensaio.

Figura 19: Espectro de aceleração e as frequências da ponte com o tráfego normal de veículos – vão de 30 m

Fonte: ANTT (2015).

Os resultados do monitoramento do vão da ponte com os experimentos de prova de carga dinâmica em diferentes velocidades e com o tráfego normal de veículos mostraram que os picos de frequência estavam entre 3 Hz e 8 Hz, aproximadamente.

4.2. MÉTODO

A coleta e as análises dos dados de GPS foram realizadas de acordo com o Método Residual de Fase (MRF) (LAROCCA, 2004). Larocca e Schaal (2010) desenvolveram o MRF para distinguir nos resíduos do processamento dos sinais GPS: o ruído eletrônico do receptor, o efeito de multicaminhamento e os deslocamentos dinâmicos e as suas frequências de vibração, esta última é uma das informações mais significativas em uma inspeção estrutural (LAROCCA, 2004; ANDRADE, 2012; MENEGHETTI *et al.*, 2012; ANDRADE *et al.*, 2013). O método é baseado no Princípio da Interferometria (Figura 20) e utiliza apenas os sinais de dois satélites para a obtenção dos resíduos do processamento da dupla diferença de fase da portadora L_1 (LEICK, 2004; LAROCCA, 2004; LAROCCA e SCHAAL, 2010). Esse método está em desenvolvimento desde o ano de 2000 e apresentou resultados animadores, também, quando aplicado no monitoramento de pontes rígidas e com vão de 30 metros (LAROCCA *et al.*, 2016; ARAÚJO NETO, 2017). O método de posicionamento utilizado foi o posicionamento relativo estático (LEICK, 2004).

Figura 20: Princípio da Interferometria de fase com os sinais e antenas GPS – Ponte suspensa e estaiada

Fonte: LAROCCA (2004).

A coleta de dados de GPS na ponte sobre o rio Jaguari foi realizada no dia 17 de Junho de 2013, às treze horas e vinte minutos (horário de Brasília) e foi dividido em três períodos de amostragem de 1 minuto. Nesta hora os satélites da constelação GPS visíveis no céu, dispostos de acordo com o método da Interferometria, eram os satélites 14 (medidor) e 31 (referência).

No levantamento dos dados na ponte, a antena do receptor *rover* se encontrava posicionada sobre o guarda-corpo do tabuleiro central, em que a ponte estava sobre ação do tráfego de veículos, e a antena do receptor base sobre um marco geodésico de centragem forçada. A linha de base formada entre os receptores *rover* e base possuía 300 m. Os receptores GNSS utilizados possuíam taxa de amostragem de 100 Hz.

O método de posicionamento relativo estático foi utilizado na coleta de dados e fez uso de dois satélites rastreados simultaneamente pelas antenas dos receptores estático (base) e *rover*, a coleta e o processamento dos dados foram realizados utilizando a dupla diferença de fase para caracterizar as oscilações verticais da antena do receptor *rover*. A Figura 21 apresenta a disposição dos satélites que precisam ser considerados de acordo com o método da dupla diferença de fase.

Figura 21: Método da dupla diferença de fase – Disposição dos satélites de referência e medidor

Fonte: Adaptado de ANTT (2015).

Os dados de campo foram pós-processados no software *Justin* da Javad, versão 2.108, para a obtenção dos resíduos do processamento dos sinais da fase da onda portadora L_1 . Este software permite escolher o satélite de referência e exportar em uma planilha os valores numéricos referentes aos resíduos do sinal do satélite medidor, com maior ângulo de elevação.

O processamento dos dados GPS de 100 Hz por meio do método da dupla diferença de fase foi realizado a partir da ferramenta *Interferometry*, implementado ao software *Justin*, que possibilitou escolher os satélites de referência com diferentes elevações, incluindo os satélites com baixa elevação, que usualmente não são tomados como satélite de referência em processamentos regulares. Resumindo, esta ferramenta permitiu identificar e escolher o satélite de referência e o medidor, o ângulo de elevação máxima e mínima, e o azimuth máximo e mínimo. Em seguida, o software calculou os resíduos de todos os satélites automaticamente (ARAÚJO NETO, 2017).

Em seguida, as filtragens dos sinais de GPS foram realizadas a partir dos filtros FFT, CWT, Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I e Passa-Faixa, assim como as análises espectrais.

O fluxograma a seguir apresenta de forma detalhada o método proposto neste trabalho (Figura 22):

Figura 22: Fluxograma do método

5. EXPERIMENTOS DE CAMPO

5.1. EXPERIMENTO PRELIMINAR OEM+GPS

A primeira coleta de dados foi realizada no dia 23 de Janeiro de 2013 com o objetivo de testar o limiar de detecção do método e das técnicas de filtragem anteriormente à coleta dos dados na ponte. O levantamento considerou o uso de dois receptores GNSS SIGMA da Javad, que possuíam taxa de amostragem de 100 Hz (100 observações por segundo), e um OEM, que foi ajustado para aplicar deslocamentos verticais na antena GPS do receptor móvel com frequência de 0,4 Hz e amplitude de deslocamento pico a pico de 4 mm, aproximadamente (LAROCCA *et al.*, 2016; ARAÚJO NETO, 2017).

Os receptores foram instalados sobre dois marcos geodésicos de centragem forçada pertencentes à rede geodésica brasileira do IBGE. O receptor base (Figura 23 – B) foi instalado no marco geodésico localizado no Instituto Federal do Sul de Minas (IFSULDEMINAS) no campus de Inconfidentes. O receptor *rover* (Figura 23 – A) foi instalado junto ao OEM em um marco geodésico próximo. A linha de base entre os marcos geodésicos possuía um quilômetro de distância, aproximadamente. As antenas dos receptores GPS do tipo *choke ring* foram utilizadas neste levantamento de campo (LAROCCA *et al.*, 2016; ARAÚJO NETO, 2017).

Figura 23: Antenas do receptor *rover* (A) e do receptor base (B)

Fonte: ARAÚJO NETO (2017).

O planejamento de levantamento de campo foi realizado por meio do software *GNSS Manning Online* para executar a escolha dos satélites de referência e de medida. Os satélites escolhidos foram da constelação GPS. Com isso, o satélite SV18 foi escolhido como referência, que estaria localizado no horizonte no momento do levantamento, e o satélite SV25 escolhido como medidor, que estaria localizado próximo ao zênite. O satélite SV25 executaria as medidas

das frequências modais da estrutura, neste caso sobre o marco geodésico onde o receptor *rover* foi instalado no dia do levantamento.

5.2. EXPERIMENTO NA PONTE SOBRE O RIO JAGUARI

Dois receptores GPS SIGMA da Javad foram utilizados neste experimento. A antena do receptor base foi instalada sobre um pilar de centragem forçada, localizado numa rotatória da BR 381 e pertencente à rede geodésica brasileira do IBGE, e a antena do receptor *rover* instalado sobre guarda-corpo do tabuleiro da ponte sobre o rio Jaguari. (LAROCCA *et al.*, 2016; ARAÚJO NETO, 2017). A faixa que representa o acostamento na ponte foi interditada pela concessionária responsável para possibilitar a coleta dos dados com o GPS.

O satélite SV31 foi escolhido como referência porque no momento do levantamento estava próximo ao horizonte, com uma elevação de 11° , e o satélite SV14 foi escolhido como medidor porque estava próximo ao zênite, com uma elevação de 75° .

Os receptores GPS foram configurados com uma taxa de gravação de 100 Hz, máscara de elevação de 5° e considerada a fase da onda portadora L_1 . Os dados de campo foram pós-processados no software *Justin* da Javad.

5.3. AZIMUTE E ELEVAÇÃO DOS SATÉLITES EM RELAÇÃO À PONTE

O azimute, a elevação e o sentido de deslocamento dos satélites visíveis no céu no dia 17 de Junho de 2013 e no instante do levantamento de dados GPS foram observados por meio do planejamento de missão. O planejamento de missão foi realizado a partir da ferramenta *GNSS Planning Online* no site da Trimble – <https://www.gnssplanning.com/#/settings>. Esta ferramenta permiti visualizar a elevação, geometria, visibilidade, as informações da ionosfera e o *Sky Plot*.

Os dois satélites da constelação GPS que apresentaram as configurações requeridas foram o SV 14 tido como medidor, o SV 31 tido como referência e uma máscara de elevação de 5° (*Cutoff*), conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24: *Sky Plote* - Disposição dos satélites considerados

Fonte: Adaptado de *GNSS Planning Online* – Trimble.

A Figura 25 apresenta o azimuth e elevação dos satélites em relação ao receptor *rover* posicionado sobre o tabuleiro da ponte monitorada.

Figura 25: Azimute e elevação dos satélites em relação ao receptor *rover*

6. RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos levantamentos preliminar e na ponte sobre o rio Jaguari, respectivamente.

6.1. DADOS COLETADOS NO EXPERIMENTO PRELIMINAR OEM+GPS

Os resultados apresentados referiram-se aos dados de resíduos do processamento da dupla diferença de fase da onda portadora L_1 coletados em um levantamento de teste realizado no dia 23 de Janeiro de 2013, em que uma antena permaneceu estática sobre um marco geodésico de centragem forçada e a outra antena fixada no OEM sobre outro marco geodésico também de centragem forçada. Esta última antena sofreu deslocamentos verticais em torno de 4 mm e uma frequência de resposta de 0,4 Hz. O GPS foi configurado a uma taxa de gravação de 100 Hz, com ângulo de corte 5° e considerados os satélites SV18 (referência) e SV25 (medidor). O tempo de amostragem foi de 5 minutos (30.000 observações) e considerada a fase da onda portadora L_1 (MOSCHAS e STIROS, 2015; LAROCCA *et al.*, 2016).

A Figura 26 apresenta os resíduos brutos obtidos a partir do pós-processamento dos dados de receptores GPS SIGMA da Javad de 100 Hz, inclusive apresentados por Araújo Neto (2017). A observação da figura, por conta da grande quantidade de dados, sinaliza a existência de oscilações periódicas nos resíduos, na janela de 30.000 segundos.

Figura 26: Resíduos Brutos OEM+GPS – Teste IFSULDEMINAS

A FFT, por sua vez, permitiu identificar a resposta espectral daquelas oscilações periódicas no domínio do tempo, ou seja, o pico em que se concentrou a energia corresponde à

frequência dos deslocamentos verticais periódicos gerados pelo OEM, com frequência de 0,4 Hz aproximadamente, conforme mostra a Figura 27.

Figura 27: Espectro – OEM+GPS – Filtro FFT

Os resíduos filtrados a partir da CWT permitiram observar a alta concentração de energia (em cor vermelha) em torno de 0,4 Hz, que corresponde à frequência que o OEM aplicou deslocamentos verticais, com amplitudes de pico de aproximadamente 4 mm, na antena *rover*, com um nível de confiança de 95%, como mostra a Figura 28. Algumas concentrações de energia (em cor vermelha) podem corresponder aos ruídos gerados pelo OEM, como o descarregamento da bateria, o próprio movimento do equipamento e uma possível folga, além do efeito do multicaminhamento de alta frequência.

Figura 28: Escalograma – OEM+GPS - Filtro CWT

A Figura 29 apresenta o resultado da filtragem dos dados com limites inferior de 0,1 Hz e superior de 5 Hz. Os limites da faixa passante do sinal permitiram observar os picos das frequências de interesse. O eixo das abscissas corresponde à frequência normalizada, em que o valor 1 Hz corresponde a 50 Hz. O eixo das ordenadas corresponde à amplitude absoluta do deslocamento vertical em unidade de milímetros.

Figura 29: Espectro – OEM+GPS – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz - 5 Hz

A Figura 30 mostra o comportamento do filtro Chebyshev de Tipo I, com faixa de 0,1 Hz a 0,5 Hz, sobre os resíduos. Com isso, foi possível observar um decaimento suave na banda de rejeição, que caracteriza o filtro Chebyshev de Tipo I.

Figura 30: Filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz - 0,5 Hz

O filtro Passa-Faixa Chebyshev de Tipo I permitiu identificar a frequência e o deslocamento gerados pela oscilação vertical do OEM. A Figura 31 mostra o pico da frequência normalizada com uma intensidade de energia de 0,0075 Hz, que equivale a 0,38 Hz, e uma amplitude absoluta de deflexão vertical de 4 mm, aproximadamente.

Figura 31: Espectro – OEM+GPS - Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz - 0,5 Hz

Os filtros utilizados no processamento dos resíduos dos dados de GPS permitiram observar suas contribuições e complementações de um em relação ao outro. A resposta espectral da CWT possibilitou obter as energias correspondentes à frequência de oscilação provocada pelo OEM e relacioná-las com deslocamentos verticais ao longo do período de coleta. Já os filtros FFT e Passa-Faixa Chebyshev de Tipo I não permitem relacionar os picos das frequências com os períodos de amostragem, mas permitiram discretizar os picos das frequências e relacioná-los com os deslocamentos verticais, respectivamente.

As respostas obtidas a partir dos filtros FFT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I apresentaram poucas diferenças em relação aos valores de frequência. O filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I permitiu descrever os valores de deslocamento vertical próximos aos valores gerados pelo OEM. O filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I também possibilitou delimitar a faixa que enquadrava a frequência do OEM, isso facilitou a análise e concomitantemente diminuiu o gasto computacional.

6.2. DADOS DE GPS DE 100 HZ DO LEVANTAMENTO NA PONTE SOBRE O RIO JAGUARI

Os resultados aqui apresentados foram referentes aos dados de resíduos de GPS de 100 Hz, obtidos por meio do ajustamento de observações a partir do método da dupla diferença da fase da onda portadora L_1 . O levantamento foi realizado sobre o tabuleiro do vão central da ponte Jaguari no dia 17 de Junho de 2013. Os receptores GPS foram configurados a uma taxa de gravação de 100 Hz, com uma máscara de elevação de 5° e considerados no pós-processamento dos dados os satélites SV31 (referência) e SV14 (medidor).

O levantamento na ponte Jaguari foi realizado sobre ação de tráfego normal de veículos e sem o auxílio do OEM. A coleta dos dados de GPS foi executada em três períodos de amostragem, que foram nomeados como A, B e C. O tempo de amostragem foi de 1 minuto (6.000 observações) cada.

A Figura 32 apresenta a série temporal dos resíduos brutos referente ao período A com um valor de pico máximo de 6,84 mm.

Figura 32: Resíduos Brutos – Período A

A média do deslocamento vertical do período A foi de -0,3 mm, com desvio padrão de 1,4 mm, aproximadamente. A Figura 33 apresenta o histograma dos resíduos brutos do período A e segue aproximadamente uma distribuição normal.

Figura 33: Histograma de resíduos brutos – Período A

A Figura 34 apresenta a série temporal dos resíduos brutos referente ao período B com um valor de pico máximo de 7,43 mm.

Figura 34: Resíduos Brutos – Período B

A média do deslocamento vertical do período B foi de 3,1 mm, com desvio padrão de 1,2 mm, aproximadamente. A Figura 35 apresenta o histograma dos resíduos brutos referente ao período B, que também segue aproximadamente uma distribuição normal.

Figura 35: Histograma de resíduos brutos – Período B

A Figura 36 apresenta a série temporal dos resíduos brutos referente ao período C com um valor de pico máximo de 7,52 mm.

Figura 36: Resíduos Brutos – Período C

A média do deslocamento vertical do período C foi de 1,2 mm, com desvio padrão de 1,5 mm, aproximadamente. A Figura 37 apresenta o histograma dos resíduos brutos referente ao período C e segue aproximadamente uma distribuição normal.

Figura 37: Histograma de resíduos brutos – Período C

As médias dos deslocamentos verticais foram discrepantes nos três períodos de séries temporais. Essas tiveram influência de ruídos causados pelo multicaminhamento do sinal de baixa e alta frequência da fase da onda portadora L_1 em conjunto com fatores externos como o

vento, a temperatura e os próprios veículos. Isso mostra a necessidade da filtragem dos dados de GPS para a inspeção estrutural do comportamento do tabuleiro do vão central da ponte Jaguari. A seguir foram apresentados os resultados e as discussões das filtrações dos resíduos brutos de GPS de 100 Hz a partir dos filtros FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I.

6.3. FILTRAGEM DOS DADOS DE GPS DO LEVANTAMENTO NA PONTE JAGUARI

As filtrações dos resíduos brutos dos dados GPS em FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I foram referentes aos dados do levantamento realizado no dia 17 de Junho de 2013 na ponte Jaguari, com os receptores GPS configurados a uma taxa de gravação de 100 Hz, coletados durante 1 minuto, com uma máscara de elevação de 5° e considerados os satélites SV31 (referência) e SV14 (medidor). O tráfego de veículos sobre a estrutura da ponte foi normal nos períodos de coleta.

A Figura 38 apresenta as respostas espectrais do período de amostragem A e mostra discretamente por meio da FFT as frequências pico a pico referentes às deflexões verticais provocadas pelo tráfego de veículos sobre o tabuleiro do vão central da ponte. Foi possível notar a ocorrência de uma leve atenuação dos valores de potência espectral entre os picos de frequências 0,5 Hz e 20 Hz, aproximadamente.

Figura 38: Espectro – Filtro FFT – Período A

A Figura 39 apresenta as respostas espectrais referentes ao período de amostragem B e as frequências indicativas às deflexões verticais provocadas pelo tráfego de veículos sobre o tabuleiro. Também foi possível observar uma atenuação dos valores de potência espectral entre os picos de frequências 1 Hz e 25 Hz, aproximadamente, que indicam a tendência de amortecimento pela passagem completa do veículo pelo vão.

Figura 39: Espectro – Filtro FFT – Período B

A Figura 40 apresenta as respostas espectrais do período de amostragem C e as frequências referentes às deflexões verticais provocadas pelo tráfego de veículos sobre o tabuleiro. Foi possível observar uma atenuação dos valores de potência espectral entre os picos de frequências 0,5 Hz e 20 Hz, aproximadamente.

Figura 40: Espectro – Filtro FFT – Período C

A filtragem dos resíduos brutos de GPS em FFT permitiu observar valores de frequências de 1 a 8 Hz nos três períodos A, B e C com amplitudes de potência espectral aproximadas, que correspondem à passagem do tráfego veicular sobre o vão da ponte.

Os resíduos de GPS dos períodos de amostragem A, B e C foram filtrados a partir da CWT e permitiram observar a alta concentração de energia (em cor laranja escuro e vermelha) nas frequências inferiores a 0,5 Hz. Estas frequências podem corresponder às influências dos efeitos atmosféricos e de multicaminhamento de baixa frequência sobre sinal da fase da onda portadora L_1 , como mostram as regiões retangulares (em cor preta) nas Figuras 41, 42 e 43, respectivamente.

Figura 41: Escalograma – Filtro CWT – Período A – Multicaminhamento **Figura 42:** Escalograma – Filtro CWT – Período B – Multicaminhamento **Figura 43:** Escalograma – Filtro CWT – Período C – Multicaminhamento

As regiões indicadas pelas setas e pelos círculos em cor preta na Figura 44 permitiram identificar as concentrações de energia (em cor laranja escuro) na faixa de frequência 0,5 Hz a 8 Hz, com um nível de confiança de 95%. O pico máximo do deslocamento vertical do período

de amostragem A foi de aproximadamente 5 mm, no instante 4.569 segundos. Este pico pode representar a passagem de veículos pesados sobre o tabuleiro no período de amostragem A.

Figura 44: Escalograma – Filtro CWT – Comportamento da estrutura sobre influência do tráfego de veículos – Período A

Na Figura 45, as regiões em destaque por meio das setas e dos círculos em cor preta indicaram as concentrações de energia (em cores laranja escuro e vermelha) na faixa de frequência 0,5 Hz a 8 Hz, com um nível de confiança de 95%. O pico máximo do deslocamento vertical do período de amostragem B foi de aproximadamente 4 mm, no instante 2.056 segundos. Este pico pode representar a passagem de veículos pesados sobre o tabuleiro no período de amostragem B.

Figura 45: Escalograma – Filtro CWT – Comportamento da estrutura sobre influência do tráfego de veículos – Período B

As regiões indicadas a partir das setas e dos círculos em cor preta na Figura 46 permitiram identificar as concentrações de energia (em cores laranja escuro e vermelha) na faixa de frequência 4 Hz a 8 Hz, com um nível de confiança de 95%. O pico máximo do

deslocamento vertical do período de amostragem C foi de aproximadamente 4 mm, no instante 5.051 segundos. Este pico pode representar a passagem de veículos pesados sobre o tabuleiro no período de amostragem C.

Figura 46: Escalograma – Filtro CWT – Comportamento da estrutura sobre influência do tráfego de veículos – Período C

Os valores de frequência de 4 Hz a 8 Hz, representadas pelas concentrações de energia em cores laranja escuro e vermelha, e os valores de deflexão vertical em torno de 5 mm, apresentados nas Figuras 44, 45 e 46, corresponderam às possíveis influências do tráfego normal de veículos sobre o tabuleiro do vão central da ponte. Estes valores de frequência e deflexão vertical foram condizentes com os valores obtidos por acelerômetros e transdutores de deslocamento apresentados no item 5.1.3.

O filtro Passa-faixa Chebyshev do Tipo I foi configurado com ordem 8 e faixa com limites inferior de 0,1 Hz e superior de 9 Hz. O eixo das abscissas corresponde à frequência normalizada em unidade de Hertz e o eixo das ordenadas corresponde à amplitude do deslocamento vertical em unidade de milímetros.

As Figuras 47, 48 e 49 permitiram identificar por meio do filtro Passa-faixa Chebyshev do Tipo I as frequências pico a pico e as amplitudes de deflexão vertical correspondentes as possíveis passagens de veículos pesados sobre o tabuleiro do vão central da ponte nos períodos de amostragem A, B e C.

A Figura 47 apresenta o comportamento do tabuleiro do vão central da ponte referente ao período de amostragem A. Os valores dos picos das frequências foram condizentes aos valores mostrados na FFT e na CWT, como por exemplo, o pico de frequência normalizada com valor de 0,09 Hz, que corresponde a 4,5 Hz e a um pico de deslocamento vertical de -3 mm, aproximadamente.

Figura 47: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz a 9,0 Hz – Período A

A Figura 48 apresenta o comportamento do tabuleiro do vão central da ponte referente ao período de amostragem B. Os valores dos picos das frequências também foram condizentes com os valores das concentrações de energia apresentados na FFT e na CWT como, por exemplo, o pico de frequência normalizada com valor de 0,12 Hz, que corresponde a 6 Hz, e um pico de deslocamento vertical com um valor de 3 mm, aproximadamente.

Figura 48: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz a 9,0 Hz – Período B

A Figura 49 apresenta o comportamento do tabuleiro do vão central da ponte referente ao período de amostragem C. Os valores dos picos das frequências foram condizentes com os

valores encontrados na FFT e na CWT, como o pico de frequência normalizada com valor de 0,16 Hz, que corresponde a 8 Hz, e um pico de deslocamento vertical com um valor de 3,5 mm, aproximadamente.

Figura 49: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,1 Hz a 9,0 Hz – Período C

Os filtros FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I utilizados para o processamento dos resíduos dos dados de GPS permitiram observar suas contribuições e as suas respectivas complementações. Os valores de frequência e deflexão vertical do tabuleiro do vão central da ponte sobre o rio Jaguari, que se encontrava sobre ação do tráfego de veículos nos períodos de amostragem A, B e C, coincidiram com os valores de frequência e amplitude máxima de deslocamento do vão central, identificados por acelerômetro e transdutor de deslocamento, que foram apresentados no item 5.1.3.

Uma filtragem prévia dos dados a partir de um filtro Passa-Faixa pode descartar a influência destes ruídos sobre as respostas espectrais e manter as informações de interesse importantes para o monitoramento dinâmico do tabuleiro. A seguir foi apresentada a filtragem prévia dos dados de GPS e os seus respectivos resultados em FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I.

6.4. FILTRAGEM PRÉVIA: FILTRO PASSA-FAIXA – RESÍDUOS DE GPS DO LEVANTAMENTO NA PONTE JAGUARI – FAIXA: 0,5 HZ A 25 HZ

Os resultados aqui apresentados foram referentes aos resíduos brutos do processamento da dupla diferença de fase, filtrados previamente por meio de um filtro Passa-Faixa. Conhecendo-se as frequências do tabuleiro do vão central da ponte, considerou-se um filtro Passa-Faixa com limites de faixa de 0,5 Hz a 25 Hz, com o intuito de minimizar as influências dos efeitos do multicaminhamento de baixa e alta frequência e de outros fatores externos que interferem o sinal da onda portadora L_1 .

A Figura 50 apresenta a série temporal dos resíduos brutos, que compreendem a faixa de 0,5 Hz a 25 Hz, referente ao período A com um valor de pico máximo de 5,62 mm.

Figura 50: Resíduos Brutos – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

A média do deslocamento vertical do período A foi de -0,00004 mm, com desvio padrão de 0,9 mm, aproximadamente. A Figura 51 apresenta o histograma dos resíduos brutos do período A e segue aproximadamente uma distribuição normal.

Figura 51: Histograma de resíduos brutos – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

A Figura 52 apresenta a série temporal dos resíduos brutos, que compreendem a faixa de 0,5 Hz a 25 Hz, referente ao período B com um valor de pico máximo de 3,83 mm.

Figura 52: Resíduos Brutos – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

A média do deslocamento vertical do período B foi de 0,003 mm, com desvio padrão de 0,9 mm, aproximadamente. A Figura 53 apresenta o histograma dos resíduos brutos referente ao período B, que também segue aproximadamente uma distribuição normal.

Figura 53: Histograma de resíduos brutos – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

A Figura 54 apresenta a série temporal dos resíduos brutos, que compreendem a faixa de 0,5 Hz a 25 Hz, referente ao período C com um valor de pico máximo de 5,34 mm.

Figura 54: Resíduos Brutos – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

A média do deslocamento vertical do período C foi de -0,002 mm, com desvio padrão de 1,2 mm, aproximadamente. A Figura 55 apresenta o histograma dos resíduos brutos referente ao período C e segue aproximadamente uma distribuição normal.

Figura 55: Histograma de resíduos brutos – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

As médias dos deslocamentos verticais foram próximas de zero nos três períodos de séries temporais de resíduos. Isso pôde comprovar que o filtro Passa-Faixa permitiu melhorar a qualidade dos resíduos de GPS, pois minimizou a influência de ruídos de baixa e alta frequência do sinal da fase da onda portadora L_1 , como os efeitos do multicaminhamento.

Os valores de deslocamento vertical, limitados pelo filtro Passa-Faixa nos três períodos de amostragem (A, B e C), tornaram-se mais condizentes com a realidade da estrutura. A seguir foram apresentados os resultados e as discussões das filtragens dos resíduos brutos de GPS de 100 Hz, com valores de frequência de 0,5 Hz a 25 Hz, a partir dos filtros FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I.

6.5. FILTRAGEM DOS DADOS DA FILTRAGEM PRÉVIA – FAIXA 0,5 HZ A 25 HZ

A Figura 56 apresenta por meio da FFT as frequências pico a pico do tabuleiro do vão central da ponte sobre solicitação do tráfego de veículos. Estas frequências foram referentes ao período de amostragem A e a uma faixa de frequência de 0,5 Hz a 25 Hz.

Figura 56: Espectro – Filtro FFT – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

A Figura 57 apresenta por meio da FFT as frequências pico a pico do tabuleiro do vão central da ponte sobre solicitação do tráfego de veículos. Estas frequências foram referentes ao período de amostragem B e a uma faixa de frequência de 0,5 Hz a 25 Hz.

Figura 57: Espectro – Filtro FFT – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

A Figura 58 apresenta por meio da FFT as frequências pico a pico do tabuleiro do vão central da ponte sobre solicitação do tráfego de veículos. Estas frequências foram referentes ao período de amostragem C e a uma faixa de frequência de 0,5 Hz a 25 Hz.

Figura 58: Espectro – Filtro FFT – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

A filtragem dos resíduos brutos de GPS em FFT na faixa das frequências de 0,5 Hz a 25 Hz permitiu enaltecer os picos de frequência com valores de potência espectral aproximados nos três períodos de amostragem (A, B e C), que foram condizentes com os valores de acelerômetro apresentados no item 5.1.3.

As Figuras 59, 60 e 61, que apresentaram os espectros da CWT dos resíduos obtidos a partir da dupla diferença de fase, indicam as regiões de alta concentração de energia limitadas pelo cone de influência – contorno de cor preta. Estas regiões limitadas pelo cone de influência permitiram identificar também os instantes em que as diversas frequências modais de vibração foram excitadas pelas possíveis passagens de veículos sobre o tabuleiro do vão central da ponte. Os resíduos de GPS dos períodos de amostragem A, B e C, respectivamente, indicam a faixa de frequências de 0,5 Hz e 25 Hz.

Figura 59: Escalograma – Filtro CWT – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

Figura 60: Escalograma – Filtro CWT – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

Figura 61: Escalograma – Filtro CWT – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

As regiões indicadas pelas setas e pelos círculos em cor preta na Figura 62 permitiram identificar as concentrações de energia na faixa de frequência 0,5 Hz a 8 Hz, com um nível de confiança de 95%. O pico máximo do deslocamento vertical do período de amostragem A foi de 6,10 mm, no instante 4.559 segundos. Este pico pode representar a possível passagem de veículos pesados sobre o tabuleiro no período de amostragem A.

Figura 62: Escalograma – Filtro CWT – Resposta do tabuleiro à ação tráfego normal – Período A – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

Na Figura 63, que ilustra o escalograma da CWT, as regiões limitadas pelo cone de influência, e indicadas pelas setas e pelos círculos em cor preta apresentaram as concentrações de energia na faixa de frequência 1 Hz a 8 Hz, com um nível de confiança de 95%. O pico máximo do deslocamento vertical do período de amostragem B foi de 4,46 mm, no instante 2.056 segundos. Este pico pode representar a possível passagem de veículos pesados sobre o tabuleiro no período de amostragem B.

Figura 63: Escalograma – Filtro CWT – Resposta do tabuleiro à ação tráfego normal – Período B – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

As regiões limitadas pelo cone de influência, e indicadas pelas setas e pelos círculos em cor preta na Figura 64 permitiram identificar as concentrações e ocorrências ao longo do tempo de energia na faixa de frequência 4 Hz a 8 Hz, com um nível de confiança de 95%. O pico máximo do deslocamento vertical do período de amostragem C foi de 4,60 mm, no instante 5.050 segundos. Este pico pode representar a possível passagem de veículos pesados sobre o tabuleiro no período de amostragem C.

Figura 64: Escalograma – Filtro CWT – Resposta do tabuleiro à ação tráfego normal – Período C – Faixa: 0,5 Hz a 25 Hz

Os escalogramas da CWT das Figuras 62, 63 e 64 permitiram observar as concentrações de maior energia (limitadas pelo cone de influência) associadas aos valores das frequências,

que foram indicadas por meio das setas e dos círculos em cor preta. Os escalogramas apresentaram uma ampliação significativa da energia das frequências modais de excitação do tabuleiro do vão central devido à passagem de veículos sobre o mesmo. Esta melhora foi graças à filtragem prévia dos resíduos de GPS a partir de um filtro Passa-Faixa. A influência de ruídos de baixa e alta frequência do sinal da fase da onda portadora L_1 foi minimizada com a delimitação da faixa de frequências de interesse. Esta filtragem permitiu identificar nos três períodos de amostragem (A, B e C) os picos máximos de deslocamento vertical gerados pelo carregamento móvel de veículos sobre o tabuleiro.

As Figuras 65, 66 e 67 apresentam a partir do filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I os resíduos de GPS dos períodos de amostragem A, B e C, respectivamente, com faixa de frequências de 0,5 Hz e 9 Hz, a partir dos dados filtrados anteriormente pelo filtro Passa-Faixa com faixa de 0,5 Hz a 25 Hz. As figuras também permitiram identificar as frequências pico a pico e as amplitudes de deflexão vertical dos períodos de amostragem A, B e C, resultantes do tráfego de veículos sobre o tabuleiro da ponte.

A Figura 65 apresenta o comportamento do tabuleiro do vão central da ponte referente ao período de amostragem A. Os valores dos picos das frequências foram condizentes com os valores da FFT e da CWT, como o pico da frequência normalizada com valor de 0,04 Hz, que corresponde a 2 Hz, e um pico de deslocamento vertical com um valor de 3,2 mm.

Figura 65: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,5 Hz a 9,0 Hz – Período A

A Figura 66 apresenta o comportamento do tabuleiro do vão central da ponte referente ao período de amostragem B. Os valores dos picos das frequências também foram condizentes com os valores das concentrações de energia apresentados a partir da FFT e da CWT como, por exemplo, o pico de frequência normalizada com valor de 0,12 Hz, que corresponde a 6 Hz, e um pico de deslocamento vertical com um valor de 3,2 mm.

Figura 66: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,5 Hz a 9,0 Hz – Período B

A Figura 67 apresenta o comportamento do tabuleiro do vão central da ponte referente ao período de amostragem C. Os valores dos picos das frequências foram condizentes com os valores encontrados a partir dos filtros FFT e CWT, como o pico de frequência normalizada com valor de 0,16 Hz, que corresponde a 8 Hz, e um pico de deslocamento vertical com um valor de 3,44 mm, aproximadamente.

Figura 67: Espectro – Filtro Passa-Faixa Chebyshev do tipo I de ordem 8 – Faixa: 0,5 Hz a 9,0 Hz – Período C

A filtragem por meio de Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I a partir dos valores de resíduos filtrados previamente por um filtro Passa-Faixa com limites de faixa de 0,5 Hz a 25 Hz, não mostrou diferenças significativas nos valores de frequências e deflexões verticais do tabuleiro do vão central da ponte nos três períodos de amostragem (A, B e C).

Os valores de frequência e deflexão vertical do vão central da ponte sobre o rio Jaguari a partir dos dados de GPS filtrados previamente pelo filtro Passa-Faixa coincidiram com os valores de frequência e amplitude máxima de deslocamento do vão central, identificados por acelerômetro e transdutor de deslocamento, apresentados no item 5.1.3, e com os resultados apresentados pelas técnicas de filtrações FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposição e uma efetivação do monitoramento geodésico de curta duração em uma ponte rodoviária curva de concreto armado, em serviço, a partir da comparação dos resultados de comportamento dinâmico das filtragens dos sinais de GPS com os valores de comportamento dinâmico de modelagem numérica e de prova de carga. O trabalho foi dividido em experimento de teste (GPS+OEM) e experimento na ponte sobre o rio Jaguari.

A primeira etapa consistiu em um levantamento preliminar para avaliar o limiar de detecção do método e das técnicas de filtragem por meio de dados de GPS de 100 Hz em conjunto com o OEM, em que as antenas dos receptores base e *rover* foram posicionadas sobre marcos de centragem forçada, com uma linha de base de 1 km e um período de amostragem de 5 min. Os dados de GPS do experimento de teste foram filtrados em FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I.

A segunda etapa consistiu em um levantamento na ponte sobre o rio Jaguari, no qual somente a faixa que representa o acostamento na ponte foi interditada pela concessionária responsável para possibilitar a coleta dos dados com o GPS. A antena do receptor base foi instalada sobre um pilar de centragem forçada, localizado numa rotatória da BR 381, próxima da ponte e a antena do receptor *rover* instalado sobre guarda-corpo do tabuleiro do vão central da ponte. A linha de base formada entre os receptores base e *rover* era de aproximadamente 300 m e o período de amostragem de 1 minuto, em três períodos distintos (A, B e C). Os dados de GPS coletados sobre a ponte foram filtrados em FFT, CWT, Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I e Passa-Faixa.

A aplicação dos filtros FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I, por meio dos dados de teste, utilizando OEM+GPS, mostraram-se eficientes para a avaliação do comportamento dinâmico vertical de estruturas, pois permitiram identificar as frequências e os deslocamentos verticais milimétricos provocados pela oscilação do OEM.

Os resultados possibilitaram observar os ganhos e as limitações dos filtros. O filtro FFT permitiu identificar as frequências e as amplitudes dos descolamentos milimétricos – da ordem de 6 mm – pico a pico correspondentes às respostas estruturais do tabuleiro à ação do tráfego real. Este filtro permitiu observar os ruídos de baixa e alta frequência, que interferem diretamente no sinal de GPS e podem mascarar as respostas espectrais da estrutura inspecionada.

A resposta espectral da CWT possibilitou identificar claramente as energias que correspondem às frequências das oscilações de resposta do tabuleiro à ação da carga dinâmica do tráfego rodoviário sobre a OAE durante um período de amostragem de 1 minuto.

As respostas obtidas por meio do filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I foram semelhantes às obtidas pelo filtro CWT. No entanto, o filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I, permitiu delimitar a faixa de frequência de oscilação vertical do tabuleiro do vão central da ponte e relacionar as frequências com as suas respectivas amplitudes de deslocamento vertical. O filtro Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I se mostrou adequado para ser utilizado em monitoramento de ponte rígida de concreto armado a partir de dados de GPS.

A filtragem prévia dos resíduos brutos de GPS de 100 Hz, a partir de um filtro Passa-Faixa, apresentou ser eficiente nos três períodos de amostragem dos três filtros utilizados, pois minimizou as influências dos ruídos sobre as respostas espectrais e manteve as informações de interesse para a inspeção do tabuleiro do vão central da ponte sobre o rio Jaguari.

Os valores de frequência e deflexão vertical do tabuleiro do vão central da ponte sobre o rio Jaguari, a partir dos resíduos brutos de GPS e dos resíduos filtrados previamente pelo filtro Passa-Faixa, nos períodos de amostragem A, B e C, coincidiram com os valores de frequência e amplitude máxima de deslocamento encontrados por meio de acelerômetros (ANTT, 2015), transdutores de deslocamento vertical e modelagem numérica hierárquica (ANDRADE, 2012), a partir de experimentos com veículo de prova de carga estático e dinâmico, e com o tráfego normal de veículos. Portanto, as técnicas de filtragens FFT, CWT e Passa-Faixa Chebyshev do Tipo I se complementaram e a hipótese de descrever o comportamento dinâmico vertical do tabuleiro do vão central de ponte de concreto armado a partir de medidas e filtragens de resíduos da dupla diferença de fase da portadora L_1 de dois satélites da constelação GPS foi corroborada.

7.2. TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros a serem desenvolvidos nessa linha de pesquisa, têm-se:

- Investigar o limiar de detecção das amplitudes de vibrações dinâmicas de tabuleiro de pontes de concreto por meio do monitoramento dinâmico de curta duração com receptores GPS com taxa de gravação de 100 Hz;
- Realizar o monitoramento dos movimentos laterais e de torção do vão central da ponte sob presença do tráfego veicular real;
- Aliar imagens de gravação de vídeo do tráfego veicular ao monitoramento do comportamento dinâmico da ponte com o uso de GPS;
- Avaliar a relação dos deslocamentos verticais e frequências de vibração do vão central da ponte com o peso dos veículos de carga que trafegam sobre a estrutura;
- Apresentar resultados de comportamento dinâmico da ponte por meio de receptores GPS com taxas de amostragens distintas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARDH, L. Modal Analyses of Two Concrete Bridges in Sweden. **Structural Engineering International**, v. 1, n. 4, p. 35–39, 1991.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Rodovias federais concedidas: Relatório 2013**. Brasília: ANTT, 322 p, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Autopista Fernão Dias - ARTERIS (Comp.). Desenvolvimento e Aplicação de Técnicas de “Structural Health Monitoring” para Avaliação Estrutural de Pontes Rodoviárias. **Relatório Final**. São Paulo: Brasil, 296 p, 2015.

ANDRADE, R. G. M. Monitoramento de curta duração de uma ponte curva em concreto armado: um estudo de caso. 2012. 144 p. **Dissertação** - Mestrado em Engenharia de Estruturas – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ANDRADE, R. G. M.; TRAUTWEIN, L. M.; BITTENCOURT, T. N. Comparison and calibration of numerical models from monitoring data of a reinforced concrete highway bridge. **IBRACON**. São Paulo, v. 6, n.1, p. 121-138, 2013.

ANTOINE, J.-P.; MURENZI, R.; VANDERGHEYNST, P.; ALI, S. T. **Two-Dimensional Wavelets and Their Relative**, Cambridge University, Cambridge, 2008.

ARAÚJO, I. D. G. Análise modal operacional: métodos de identificação baseados em transmissibilidade. **Doutorado (Tese)**. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2015.

ARAÚJO, I. D. G.; LAIER, J. E. Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 46, n. 1, p. 129–145, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.01.001>>.

ARAÚJO NETO, J. O.; TRABANCO, J. L. A.; LARocca, A. P. C.; BARBOSA, A. C. B.; SCHAAL, R. E. Monitoring the Vertical Deflections of the Small Concrete Bridge with the adapted Phase Residual Method using High Rate GPS Data. In: 2nd **Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)**, Nottingham, England. 2013.

ARAÚJO NETO, J. O. Uso do GPS no monitoramento dinâmico da infraestrutura de transportes: pontes rodoviárias em concreto. 2017. 201 p. **Tese de Doutorado** - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

ASSIS, W. S. Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de Engenharia Civil. 2007. 265 p. **Tese** - Doutorado em Engenharia de Estruturas – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestre em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas**. Rio de Janeiro, 2013.

BACHMANN, H. *Vibration problems in structures: practical guidelines*, **2nd ed.** Birkhäuser, Basel, 1997.

BAO, Y.; GUO, W.; WANG, G.; ASCE, M.; GAN, W.; ZHANG, M.; SHEN, J. S. Millimeter-Accuracy Structural Deformation Monitoring Using Stand-Alone GPS : Case Study in Beijing, China. **Journal of Surveying Engineering**, v. 144, n. 1, p. 1–14, 2018.

BARBOSA, A. C. B.; BLITZKOW, D. Ondaletas: Histórico e Aplicação. Lecture Notes. Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences – **University Sao Paulo - IAG/USP and POLI/USP**, 2008. 39 p. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/ptr/lgt/FTP/Apostila_Ondaletas_%20MSc.Augusto_Barbosa&Dr.Denizar_Blitzkow.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2014.

BOLZAN, M. J. A. Transformada em Ondeleita: Uma necessidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 28, n. 4, p. 563-567, set. 2006.

BUTKOV, E. **Mathematical Physics**. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1968.

BROWNJOHN, J. M. W.; DUMANOGLU, A. A.; SEVERN, R. T.; BLAKEBOROUGH, A. Ambient Vibration Survey of the Bosphorus Suspension. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, v. 18, p. 263–283, 1989.

CASCIATI, F.; CASCIATI, S.; FARAVELLI, L.; VECE, M. Validation of a Data-fusion Based Solution in view of the Real-Time Monitoring of Cable-Stayed Bridges. **Procedia Engineering**, v. 199, p. 2288–2293, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.279>>.

CHUI, C. **An introduction to Wavelets**. Academic Press, San Diego, v. 1, 1992.

CHRZANOWSKI, A.; CHEN, Y.Q.; LEEMAN, R; LEAL, J. Integration of the Global Positioning System with geodetic levelling surveys in ground subsidence studies. **Proceedings 5th International (FIG) Symposium on Deformation Measurement and 5th Canadian Symposium on Mining Surveying and Rock Deformation Measurements**, eds. A. Chrzanowski and W. Wells, FIG and CISM, Fredericton, 6-9 June, pp. 142-151, 1988.

CHRZANOWSKI, A.; CHEN, Y.Q.; LEAL, J. Modelling of ground subsidence from a combination of GPS and levelling surveys. In **Global and Regional Geodynamics, Proceedings of International Association of Geodesy Symposium 101**, eds. P. Vyskocil, C. Reigber, and P. Cross, Edinburgh, 3-5 August, 1989, Springer-Verlag New York, Inc., pp. 182-191, 1990.

DAUBECHIES, I.; MALLAT, S.; WILLSKY, A. S. Introduction to the special issue on Wavelet Transforms and Multiresolution Signal Analysis. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 38, n. 2, p. 529–532, mar. 1992.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria Geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais – OAE (Minuta)**. 1. Ed. Brasília D.F. – 2016. 102 p.

EWINS, D. J. **Modal Testing: Theory and Practice**. Wiley, New York, 1984, 269 pages.

FARHEY, D. N. Bridge Instrumentation and Monitoring for Structural Diagnostics. **Structural Health Monitoring**. Dayton, v. 4, 2005.

FELBER, A. J. Development of a Hybrid Bridge Evaluation System. **PhD (Thesis)**. THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, 1993.

GABOR, D. Theory of communication. **Journal of the Institute of Electrical Engineering**, London, v. 93, n. 26, p. 429 – 441, nov. 1946. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5298517&isnumber=5298484>>. Acesso em: 01 ago. 2018.

HAN, H.; WANG, J.; MENG, X.; LIU, H. Analysis of the dynamic response of a long span bridge using GPS/accelerometer/anemometer under typhoon loading. **Engineering Structures**, v. 122, p. 238–250, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.041>>.

KALOOP, M. R.; LI, H. Monitoring of Bridge Deformation Using GPS Technique. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 13, n. 6, p. 423-431, nov. 2009.

KALOOP, M.; HU, J.; SAYED, M. Bridge Performance Assessment Based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System with Wavelet Filter for the GPS Measurements. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 4, p. 2339–2361, 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2220-9964/4/4/2339>>.

KALOOP, M. R.; HU, J. W. Optimizing the de-noise neural network model for GPS time-series monitoring of structures. **Sensors (Switzerland)**, v. 15, n. 9, p. 24428–24444, 2015.

KALOOP, M. R.; LI, H. Multi input-single output models identification of tower bridge movements using GPS monitoring system. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 47, n. 1, p. 531–539, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.046>>.

KALOOP, M.; ELBELTAGI, E.; ELNABWY, M. Bridge Monitoring with Wavelet Principal Component and Spectrum Analysis Based on GPS Measurements: Case Study of the Mansoura Bridge in Egypt. **J. Perform. Constr. Facil. (ASCE)**, v. 29, n. 3, p. 401-407, 2015.

LAROCCA, A. P. C. O uso do GPS como instrumento de controle de deslocamentos dinâmicos de obras civis - Aplicação na área de transportes. 2004. 218 p. **Tese de Doutorado** – Curso de Engenharia de Transportes. School of Engineering of São Carlos (EESC-USP), Universidade de São Paulo, 2004.

LAROCCA, A. P. C.; SCHAAL, R. E.; BARBOSA, A. C. B. Low frequency vibrations: Detection with high-rate data and filtering. **GPS World**, 21(4), 28–35, 2010. Disponível em: <<http://gpsworld.com/surveybuilt-structureslow-frequency-vibrations-9770/>>. Acesso em: jan. 2018.

LAROCCA, A. P. C.; ARAÚJO NETO, J. O.; BARBOSA, A. C. B.; TRABANCO, J. L. A.; CUNHA, A. L. B. N. Dynamic Monitoring Vertical Deflection of Small Concrete Bridge Using Conventional Sensors and 100 Hz GPS Receivers. **Journal of Engineering IOSR**, 4(09), pp. 09-20, 2014.

LAROCCA, A. P. C.; ARAÚJO NETO, J. O.; TRABANCO, J. L. A.; BARBOSA, A. C. B.; CUNHA, A. L. B. N.; SCHAAL, R. E. Uso de Receptores GPS de 100 Hz na Detecção de Deflexões Verticais Milimétricas de Pontes de Concreto. **Bulletin of Geodetic Sciences**, 21(2), pp. 290-307, 2015.

LAROCCA, A. P. C.; DE ARAUJO NETO, J. O.; ALVES TRABANCO, J. L.; DOS SANTOS, M. C.; BARROS BARBOSA, A. C. First Steps Using Two GPS Satellites for Monitoring the Dynamic Behavior of a Small Concrete Highway Bridge. **Journal of Surveying Engineering**, v. 142, n. 3, p. 1–8, 2016.

LEICK, A. GPS satellite surveying, **John Wiley & Sons, Inc.**, Hoboken, New Jersey. 2004.

LEPADATU, A.; TIBERIUS, C. GPS for structural health monitoring - Case study on the Basarab overpass cable-stayed bridge. **Journal of Applied Geodesy**, v. 8, n. 1, p. 65–85, 2014.

LIU, C. L. A **Tutorial of the wavelet transform**. Taipei: Department of Electrical Engineering, National Taiwan University, China, feb. 2010. 71 f. Disponível em <<http://disp.ee.ntu.edu.tw/tutorial/WaveletTutorial.pdf>>. Acesso em: 31 jul. 2018.

LOVSE, J. W.; TESKEY, W. F.; LACHAPELLE, G.; CANNON, M. E. Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology. **Journal of Surveying Engineering**, Vol. 121, No. 1, pp.35-40, 1995.

MAGALHÃES, F.; CUNHA, A.; CAETANO, E. Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v. 28, p. 212–228, 2012.

MALLAT, S. **A Wavelet Tour of Signal Processing**. Academic Press, San Diego, 2nd ed, 1999.

McLELLAN, J. F.; PORTER, T. R.; PRICE, P. St. Pipeline deformation monitoring using GPS survey techniques. **J. Surv. Eng.**, v. 115, n. 1, p. 56–66, 1989. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(1989\)115:1\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(1989)115:1(56))>.

MENDES, P. T. C. Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras. 2009. **Tese de Doutorado** – Engenharia de Estruturas. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-29062009-103830/pt-br.php>>.

MENEGHETTI, L. C.; TEIXEIRA, R. M.; SALAROLI, F.; BITTERN COURT, T. N. Desenvolvimento e aplicação de técnicas de structural health monitoring para avaliação estrutural de pontes rodoviárias. **Revista ANTT**, Brasília, v. 4, n. 1, p.112-123, nov. 2012.

MENG, X. Real-time deformation monitoring of bridges using GPS/accelerometers. **The University of Nottingham**, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, 2002.

MENG, X.; DODSON, A. H.; ROBERTS, G. W. Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers. **Eng Struct** 29 (11): 3178–3184, 2007. doi: 10.1016/j.engstruct.2007.03.012

MEYER, Y. **Wavelets: algorithms and applications**. 1nd ed. Philadelphia: SIAM, 1993. 133p.

MONTILLET, J.; SZELIGA, W. M.; MELBOURNE, T. I.; FLAKE, R. M.; SCHROCK, G. Critical Infrastructure Monitoring with Global Navigation Satellite Systems. **Journal of Surveying Engineering**, v. 142, n. 2004, p. 1–13, 2016.

MORETTIN, P. A. Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas de Séries Temporais. **2ed. São Paulo: Editora USP**, 556 p, 2014.

MORLET, J. Sampling Theory and Wave Propagation. **NATO ASI Series**, v. 1, p. 233–261. Springer, Berlin, 1983.

MOSCHAS, F.; STIROS, S. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. **Eng Struct** 33 (1): 10–17, 2011. doi: 10.1016/j.engstruct.2010.09.013

MOSCHAS, F.; STIROS, S. C. Three-dimensional dynamic deflections and natural frequencies of a stiff footbridge based on measurements of collocated sensors. **Struct Control Health Monit** 21(1):23–42. 2014. doi:10.1002/stc.1547

MOSCHAS, F., STIROS, S. Dynamic Deflections of a Stiff Footbridge Using 100-Hz GNSS and Accelerometer Data. **Journal of Surveying Engineering**. Volume 141, Issue 4, November 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000146](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000146)

MUFTI, A. **Guidelines for Structural Health Monitoring**. Winnipeg: ISIS Canada Corporation, 2001.

NYQUIST, H. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 47, n. 2, p. 617–644, 1928.

PAPOULIS, A. **The Fourier Integral and its Applications**. McGraw-Hill, New York, 1962.

PROTÁZIO, J. M. B. Análise wavelet aplicada a sinais geofísicos. 2002. 124 f. **Dissertação** (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências Universidade, Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

PSIMOULIS, P.; HOULIÉ, N.; MEINDL, M.; ROTHACHER, M. Consistency of PPP GPS and strong-motion records: case study of Mw9.0 Tohoku-Oki 2011 earthquake. **Smart Structures and Systems**, Nottingham, Inglaterra, 16 (2), p. 347–366, 2015. Techno Press. DOI: 10.12989/sss.2015.16.2.347. Disponível em: <http://eprints.nottingham.ac.uk/35259/1/Psimoulis_et_al_SSS_2015.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2017.

RIGUEIRO, M. C.a S. Avaliação dos efeitos dinâmicos em pontes ferroviárias de alta velocidade de pequeno e médio vão. Coimbra. Universidade de Coimbra, 448 p., **Tese de Doutorado**, 2007.

ROBERTS, G. W.; MENG, X.; DODSON, A. H. The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to Monitoring the Deflections of Large Bridges. In: **10th FIG Symposium on Deformation Measurements**. California, USA, 19-22 March 2001.

ROCHA, V. B. Uma abordagem de wavelets aplicada à combinação de previsões: análise teórica e experimental. 2008. 155 f. **Dissertação** (Mestrado) – Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

SHENOI, B. A. Introduction to digital signal processing and filter design. **John Wiley & Sons**, 2005.

SINAENCO. Sindicato da Arquitetura e da Engenharia. Infra-Estrutura da Cidade de São Paulo: Prazo de Validade Vencido, São Paulo, 2017. **Relatório Final**. 2017. Disponível em: <<http://sinaenco.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Estudo-PVV-SP-2007-1.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

STIROS, S., MOSCHAS, F. Rapid Decay of a Timber Footbridge and Changes in Its Modal Frequencies Derived from Multiannual Lateral Deflection Measurements. **Journal of Bridge Engineering**. Volume 19, Issue 12, December 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000629](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000629)

SUN, Z.; ZOU, Z.; ZHANG, Y. Utilization of structural health monitoring in long-span bridges: Case studies. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 24, n. 10, p. 1–12, 2017.

TAKEUCHI, R.; ZHANG, X.; YOSHIKAWA, T.; TAKEI, Y. Design of Chebyshev-type IIR filters with approximately linear phase characteristics. **Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science)**, 87(2), 1-9, 2004.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. **Acórdão 725/2012** – Plenário. Brasília, 2012.

VAN LE, H.; NISHIO, M. Time-series analysis of GPS monitoring data from a long-span bridge considering the global deformation due to air temperature changes. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 5, n. 4, p. 415–425, 2015.

VAZQUEZ B., G. E.; GAXIOLA-CAMACHO, J. R.; BENNETT, R.; GUZMAN-ACEVEDO, G. M.; GAXIOLA-CAMACHO, I. E. Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the Juarez Bridge using GPS technology. In **Measurement**, Volume 110, p. 146-153, 2017, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.026>.

WANG, G. X.; DING, Y. L. Mathematical modeling for lateral displacement induced by wind velocity using monitoring data obtained from main girder of Sutong cable-stayed bridge. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, 2014.

WANG, J.; MENG, X.; QIN, C.; YI, J. Vibration frequencies extraction of the forth road bridge using high sampling GPS data. **Shock and Vibration**, 2016.

WANG, D.; MENG, X.; GAO, C.; PAN, S.; CHEN, Q. Multipath extraction and mitigation for bridge deformation monitoring using a single-difference model. **Advances in Space Research**, v. 60, n. 12, 2017.

WRONA MACIEJ, GRZEGORZ NYKIEL, M. S. USING GNSS BASED SYSTEM FOR INVESTIGATION. **Geodesy and Mine Surveying**, v. 1, p. 645–652, 2014.

XIONG, C.; LU, H.; ZHU, J. Operational Modal Analysis of Bridge Structures with Data from GNSS/Accelerometer Measurements. **Sensors**, v. 17, n. 3, p. 436, 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/3/436>>.

YI, T.; LI, H.; GU, M. Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge. **Measurement**, v. 46, n.1, p. 420-432, jan. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112002874#>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

YIGIT, C. O.; GURLEK, E. Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**. v. 5705, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1284160>>.

YU, M.; GUO, H.; CHENGWU, Z. Application of wavelet analysis to GPS deformation monitoring. In: Position, Location, and Navigation Symposium, 1nd., 2006, San Diego, USA. **ION**. San Diego: IEEE, 2006. v.1, p. 670-676, 2006. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1650660>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

ZHENG, D; ZHONG, P.; DING, X.; CHEN, W. Filtering GPS time-series using a Vondrak filter and cross-validation. **J Geodesy**, 79:363–9, 2005.