

# MONITORAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS

*D. C. Mlenek<sup>1,2</sup>, L. A. K. Veiga<sup>2</sup>, D. R. Palazzo<sup>2</sup>, L. F. Silva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura ITTI-UFPR, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná, Brasil

Comissão II - Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

## RESUMO

O constante avanço da tecnologia, o uso constante de plataformas baseadas em internet das coisas, nano sensores, Big Data entre outros vem modificando os modos tradicionais de trabalho e por consequência atingindo primeiramente as áreas relacionadas a engenharia. Sensores embarcados em dispositivos móveis estão acessíveis a grande parcela da população e vão além de otimizar a experiência dos usuários com seus dispositivos. Os sensores disponíveis nestes equipamentos podem ser utilizados para a determinação de deslocamentos, através do uso dos seus acelerômetros e giroscópio, porém ainda sem a precisão necessária em diversos trabalhos de engenharia.. Este trabalho visa verificar o emprego de Smartsensors no monitoramento de vibrações de estruturas comparadas com métodos tradicionais baseados em mensurações topográficas e geodésicas.

**Palavras chave:** Monitoramento de Estruturas, Sensores Inteligentes, Vibrações.

## ABSTRACT

The constant advancement of technology, the constant use of based platforms IoT, nano sensors, Big Data among others has been changing the traditional ways of working and therefore reaching first the areas related to engineering. Sensors embedded in mobile devices are accessible to a large portion of the population and go beyond optimizing the user experience with their devices. The sensors available in these equipments can be used for the determination of displacements, through the use of its accelerometers and gyroscope, but still without the necessary precision in several engineering works .This work aims to verify the use of Smartsensors in the monitoring of vibrations of structures compared with traditional methods based on topographic and geodetic measurements.

**Keywords:** Structural Monitoring, Smart Sensors, Vibrations.

### 1- INTRODUÇÃO

Atualmente os componentes eletromecânicos e uma gama variada de sensores estão constantemente presentes em várias operações diárias e são levados para todos os lugares sem serem percebidos. Um exemplo são os smartphones, equipados com diversos sensores como: GPS, magnetômetros, acelerômetros, giroscópios, microfones, câmeras digitais entre outros, com o objetivo de melhorar a experiência do usuário com o uso do dispositivo, além de possibilitar a sua aplicação em um grande número de aplicações. Os smartphones, podem ser vistos também como ferramentas de coleta e processamento de dados, possibilitando a geração de grande volume de informações.

Na engenharia, questiona-se constantemente com relação à precisão destas informações, relacionadas à uma variada gama de sensores e usuários, quando comparados a sensores robustos e o emprego de técnicas consolidadas.

Para verificar a potencialidade de uso de smartsensors embarcados em plataformas de smartphones no monitoramento de comportamento estrutural, foram realizadas observações com sensores embarcados e armazenados no próprio smartphone, simultaneamente com observações topográficas e geodésicas. Estas informações foram pós-processadas com o objetivo de determinar a frequência de vibração de uma estrutura, aplicando análises estatísticas para a verificação de correspondência entre as técnicas consolidadas, utilizadas atualmente, e os dados obtidos pelos smartsensors, visando o desenvolvimento futuro de metodologias que tornem possível o emprego destes sensores em mensurações voltadas a engenharia.

### 2- ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em uma estrutura sujeita a movimentações, a ponte metálica sobre o Rio da Várzea de apenas uma pista de rolagem, localizada na rodovia PR427, no limite dos municípios de Campo do Tenente e Lapa, Estado do Paraná.

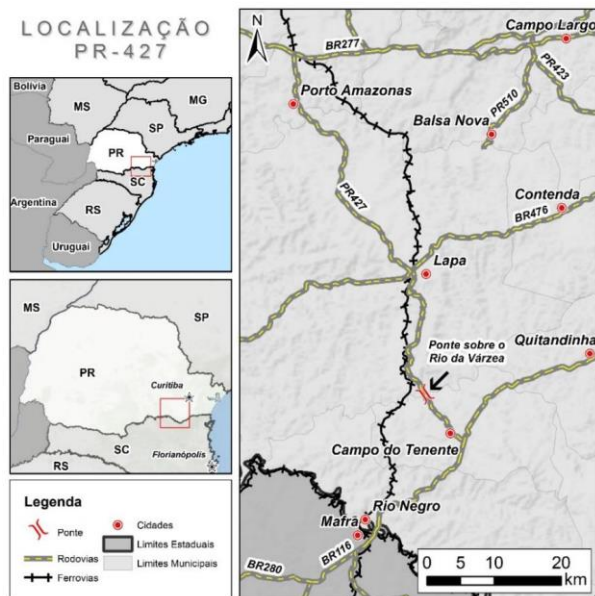


Figura 1 - Localização da área de estudo.

### 3- METODOLOGIA

#### 3.1- MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

As dimensões das seções foram obtidas por meio de medidas diretas utilizando trena, paquímetro e trena a laser, além de imagens digitais que possibilitaram a extração de dimensões utilizando técnicas fotogramétricas e levantamento topográfico aplicando técnicas de poligonização e irradiação tridimensional fazendo uso de um referencial local.

Com as dimensões de interesse mensuradas, foi possível elaborar o modelo tridimensional da ponte. Foram então reproduzidas as seções, cortes, perfis e demais elementos estruturais da ponte no software Trimble SketchUp, aplicando-se ao final da modelagem texturas de acordo com os materiais que compõe a mesma, apresentando assim a ponte com suas dimensões reais e com aparência semelhante a atual (Figura 2).

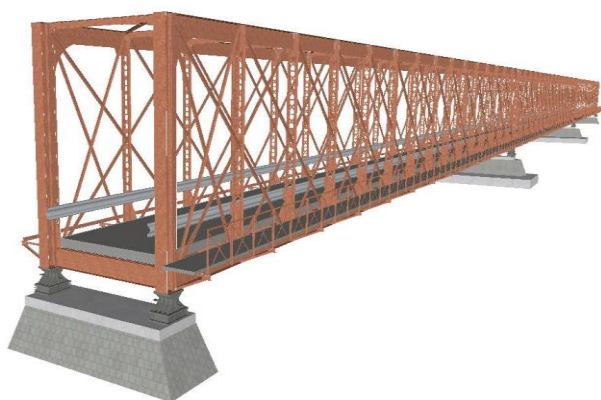


Figura 2 - Modelo tridimensional da ponte.

#### 3.2- INVESTIGAÇÃO DA ESTRUTURA DA PONTE

A ponte em estudo enquadra-se no design conhecido como Double Intersection Pratt, com pequenas modificações nas extremidades, onde há a inserção de montantes, design este que bastante utilizado para construção de pontes ferroviárias de longa extensão a partir de 1863.

Pontes construídas em treliças metálicas, são bastante resistentes a cargas, pois os triângulos que compõe a sua estrutura dão rigidez à mesma. Quando exposta a cargas, no meio do vão, as vigas superiores sofrem compressão no sentido longitudinal da ponte e as vigas inferiores sofrem tração no mesmo sentido, os apoios sofrem compressão no sentido vertical, sobre os apoios as vigas superiores sofrem tração no sentido longitudinal da ponte e as vigas inferiores são comprimidas no mesmo sentido. (Figura 3)

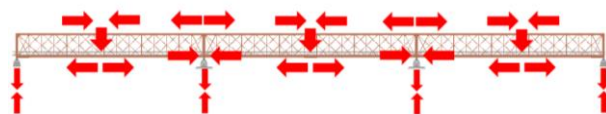


Figura 3 - Forças atuantes na estrutura.

#### 3.3- APLICAÇÃO ANDROID

Embora existam inúmeros aplicativos para a medição da aceleração disponíveis, optou-se pelo desenvolvimento de um aplicativo para garantir as grandezas mensuradas e a definição dos sensores e parâmetros. A aplicação foi desenvolvida através da plataforma online APP Inventor disponibilizada pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology), que através do conhecimento de lógica de programação é possível desenvolver aplicativos realizando a combinação de blocos que representam funções específicas.

A aplicação desenvolvida (Figura 4) concentra-se exclusivamente no desenvolvimento lógico da leitura do sensor acelerômetro do dispositivo móvel, armazenamento destas leituras em um arquivo de texto para possibilitar o processamento e o desenvolvimento de interface visual para o funcionamento básico da aplicação em plataforma Android.

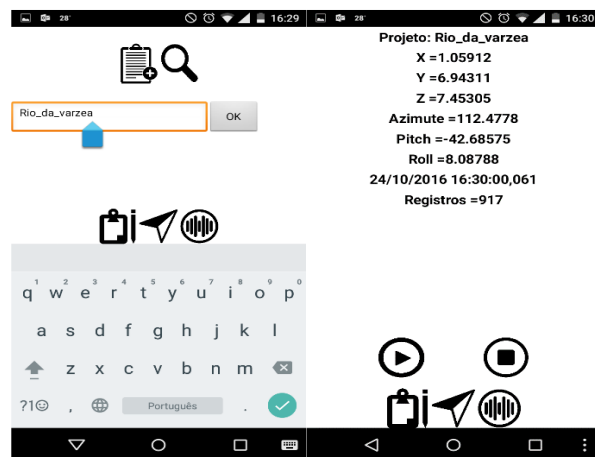


Figura 4 - Interface da aplicação Android.

### 3.4- PLANEJAMENTO DO MONITORAMENTO

Para a realização do monitoramento foi utilizado como base algumas considerações dispostas na NBR 15307 que trata do procedimento para ensaios não destrutivos com provas de carga dinâmicas em grandes estruturas. Onde é proposta a mensuração da vibração natural, grandeza onde compreendem as vibrações provenientes de ações externas como o vento e tráfego, sem a necessidade de aplicação de carga ou carregamento específico, prevê o estudo do projeto estrutural ou na falta no mesmo o conhecimento dimensional da estrutura e uma previa inspeção visual a respeito das condições da estrutura. Com base na NBR 15307 foram definidos os pontos de interesse na estrutura a serem monitorados sendo:

- O ponto central do vão principal;
- O apoio fixo, que se encontra atualmente dentro do leito do rio.

### 3.5- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

No monitoramento foram utilizados os seguintes equipamentos: Uma estação total robótica Leica TS15, um par de receptor GNSS Leica GS15, um acelerômetro ST LIS3DH embarcado no smartphone Motorola Moto G1, dois tripés, um prisma 360° e um adaptador desenvolvido para acoplar o prisma e a antena GNSS no mesmo eixo vertical com adaptação para fixação do smartphone (Figura 5). Os equipamentos foram previamente testados em uma plataforma para testes que aplica movimentos verticais com frequência de 1Hz.

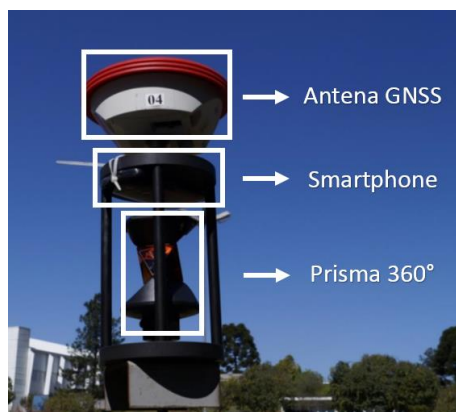


Figura 5 - Adaptador.

### 3.6- MONITORAMENTO

O monitoramento da ponte ocorreu no dia 10 de novembro de 2016, em condições de tráfego normal no período das 12:00 horas às 14:00 horas. Durante as observações, a velocidade média do vento foi de 14km/h com direção de origem predominante no azimute 260°, temperatura média de 24,5°C, umidade média relativa do ar de 65% e pressão atmosférica média de 1012 mbar.

Os equipamentos utilizados no monitoramento foram fixados fazendo uso do adaptador para o prisma e antena GNSS com auxílio de abraçadeiras de nylon na lateral da ponte, (Figura 6) devido a questões de segurança que impossibilitaram a instalação na parte superior da mesma, onde as condições para o posicionamento geodésico seriam melhores devido a ausência de obstruções



Figura 6 - Fixação dos sensores.

#### 3.6.1- MONITORAMENTO TOPOGRÁFICO

As observações topográficas foram obtidas por irradiações por meio da estação total robótica Leica TS15, com a realização de leituras automáticas no prisma, com taxa nominal de gravação de dados em 10 Hz, porém, verificou-se que a taxa real de gravação de dados foi de 6 Hz, podendo assim determinar com segurança somente frequências menores que 3Hz, devido ao efeito Aliasing.

As leituras de distância foram submetidas a correções ambientais com a finalidade de reduzir a interferências oriundas das condições atmosféricas que atuam na velocidade de propagação da onda eletromagnética.

A sensibilidade na detecção de deslocamentos com a estação total está relacionada à amplitude dos deslocamentos, à distância de observação e a área de intensidade máxima de retorno do sinal.

#### 3.6.2- MONITORAMENTO GEODÉSICO

O método de posicionamento utilizado foi o relativo estático, com implantação de uma estação base nas imediações da estrutura monitorada. Para o processamento da estação base utilizou como referência a estação UFPR integrante da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, com uma linha de base de 72,6 quilômetros, de acordo com as recomendações para levantamento relativo estático – GPS do IBGE o tempo mínimo de rastreamento é de 03 horas, seguindo as instruções e atingindo assim precisões milimétricas para a estação base.

A taxa de gravação dos dados utilizada foi de 20Hz, sendo esta, a maior taxa de gravação de dados possível pelo equipamento utilizado. Com esta taxa de gravação de dados se torna possível em alguns casos determinar frequências menores que 10 Hz, em decorrência do efeito Aliasing.

O local de estudo conta com diversas interferências ao sistema de rastreamento GNSS, dentre elas a lamina d'água gerada pelo curso do rio, a estrutura metálica da ponte, a existência de duas redes de transmissão em ambos os lados da ponte, a ocorrência de vegetação próxima dos pontos de rastreamento e ainda o horário das observações em que a constelação GPS é menos favorável.

Para otimização da confiabilidade do processamento GNSS foi aplicado o mapa de obstruções referente ao local do rastreamento, aplicação das informações referentes as efemérides rápidas fornecidas pelo International GNSS Service e feito uso das constelações GPS e GLONASS essenciais para a resolução das ambiguidades devido a situação adversa ao posicionamento geodésico do local de estudo.

O sistema de coordenadas geodésicas foi transformado em um sistema de coordenadas no plano topográfico, devido a necessidade de analisar os deslocamentos no mesmo referencial e sistemas de unidades.

### 3.6.3- MONITORAMENTO COM SMARTSENSOR

As mensurações de aceleração por meio do sensor embarcado no smartphone, foram realizadas e armazenadas por intermédio do aplicativo desenvolvido, juntamente com as grandezas de aceleração foram gravadas informações do campo magnético e pressão sonora, com uma taxa de gravação de 10Hz.

### 3.6.4- OUTRAS PARTICULARIDADES

Para que as mensurações obtidas pelos distintos sensores correspondam com as vibrações o referencial tempo teve que ser ajustado, tomando-se como referencial padrão o relógio do smartphone.

Foi definido um sistema de referência local sobre a estrutura da ponte, orientado de forma que os eixos representem direções exatamente sobre a estrutura de ponte, o eixo X está relacionado a direção transversal da ponte, o eixo Y a direção longitudinal e o eixo Z a direção vertical em direção ao zênite.

As coordenadas obtidas pelos sensores instalados sobre a ponte, tiveram suas coordenadas transladadas e rotacionadas quando necessário para o sistema referencial da ponte. Os três sistemas compreendem sistemas dextrogiros, quais foram observados os sinais das rotações a serem aplicadas de acordo com os sentidos das mesmas.

Para as análises foram considerados eventos particulares dentre eles: o maior período sem uso, o

maior período com uso, veículos de carga em sentidos opostos e veículos leves em sentidos opostos.

### 3.6.5- PROCESSAMENTO

Para determinação da frequência de vibração natural da estrutura, frente a mensurações aplicando diversas técnicas, precisões, amostragens e grandezas físicas, foi aplicado a transformada rápida de Fourier indicada para o processamento de sinais.

No software Matlab, foi implementado um código que executa a transformada rápida de Fourier, onde o mesmo é capaz de ler um conjunto de dados e retornar como resposta a análise do espectro de frequências, frequência predominante e a amplitude das ondas.

## 4- RESULTADOS

Durante o período de monitoramento foram observados a passagem individual ou simultânea de 139 veículos, onde foram tomados os horários de início e término de uso da ponte e o modelo do veículo.

Para todos os eventos selecionados, foram determinados a frequência de vibração e a amplitude, a figura 7, apresenta um exemplo gráfico da execução do algoritmo da transformada rápida de Fourier.

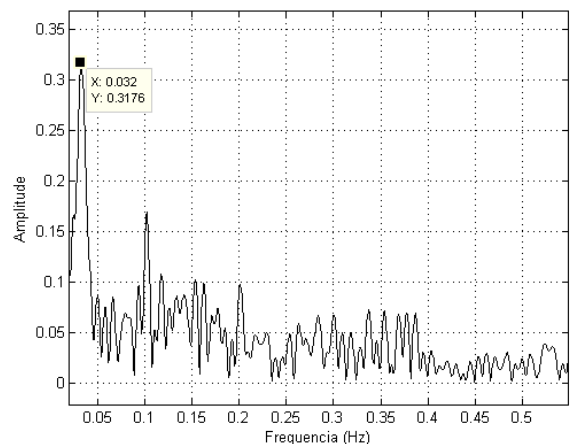


Figura 7 - Espectro de frequência.

Foram selecionados 4 eventos para uma breve apresentação dos resultados obtidos, (Tabela 1) sendo eles o maior período sem uso da ponte (ID = 1), o maior período de uso simultâneo (ID = 2), uso da estrutura por um veículo de carga com 6 eixos (ID = 3) e o período de uso por um veículo leve (ID = 4). As mensurações geodésicas estão dispostas na coluna GNSS, mensurações topográficas na coluna Topo e as mensurações do Smartsensor na coluna ACC.

Submetendo os resultados obtidos por métodos que propiciam resultados métricos (mensurações geodésicas e mensurações topográficas) a uma regressão linear considerando os deslocamentos relativos foi obtido um coeficiente de determinação igual a 55,75% e um coeficiente de correlação de 74,67%, não foi aplicada a mesma análise aos dados

provenientes do acelerometro devido a grandezas físicas e sistemas de unidades diferentes.

Tabela 1 - Frequências e amplitudes.

ID	Frequências (Hz)			Amplitudes máximas		
	GNSS	Topo	ACC	GNSS(m)	Topo(m)	ACC(g)
1	0,032	0,085	0,076	0,015	0,001	0,135
2	0,164	0,105	0,252	0,094	0,001	0,064
3	0,378	0,475	0,476	0,062	0,010	0,283
4	1,144	1,046	1,871	0,017	0,001	0,036

## 5- CONCLUSÃO

A modelagem tridimensional da ponte foi essencial para o planejamento do monitoramento, sendo que quando necessário a verificação de dimensões da ponte as mesmas eram facilmente consultadas no modelo tridimensional.

É considerado relativamente fácil o emprego de smartsensors para mensuração de grandezas físicas, considerando ainda que existem aplicações já implementadas para fins específicos. Devendo aplicar técnicas avançadas no processamento destes dados devido a sensibilidade e precisão muitas vezes não atenderem a demanda que o estudo necessita.

Existe a necessidade de estimar as frequências aproximadas a serem monitoradas, para que a taxa da observação empregada no monitoramento seja suficiente para a identificação das frequências e evitar o efeito Aliasing.

Por questões de segurança para a instalação do conjunto de sensores na parte superior da ponte, acrescentada das influências existentes no local, as mensurações geodésicas foram as mais afetadas, o pós-processamento visou minimizar estas influências, porem ressalta-se que o local de instalação não foi o ideal.

A aplicação da transformada rápida de Fourier comportou-se de modo satisfatório quando aplicada a determinação de frequências de vibração, nos ensaios onde os movimentos eram uniformes, cíclicos e contínuos, obteve-se resultados excelentes entre os dados oriundos de diferentes equipamentos de mensuração apresentando discrepâncias máximas de 0,01Hz. Já no monitoramento, para movimentos não uniformes e que não apresentam um comportamento cíclico as frequências determinadas apresentaram discrepâncias máximas de 0,8255Hz para os mesmos

eventos fazendo-se uso de equipamentos de mensuração distintos.

Para que as análises sejam eficazes recomenda-se a execução de testes comparativos entre os acelerômetros embarcados em smartphones com acelerômetros de maior sensibilidade para que os dados comparados estejam sobre o mesmo referencial e o mesmo sistema de unidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR15307. Ensaios não destrutivos – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

Centro Brasileiro da Construção em Aço. Projeto de pontes e viadutos rodoviárias de aço e mistas aço e concreto. Rio de Janeiro, 2014.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Recomendações para levantamentos relativos estáticos GPS. Rio de Janeiro, 2008.

Lotufo, A. D. P. Matemática Aplicada à Engenharia Elétrica. Capítulo 05. UNESP. São Paulo, 2016.

Oliveira, H. M. Análise de Fourier e Wavelets: sinais estacionários e não estacionários. Editora Universitária – UFPE, Recife, 2007.

Palazzo, D. R. Monitoramento de pontes por meio de levantamentos topográficos – Um estudo de caso. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

Palazzo, D. R. O uso de uma ETR associada a um sistema geodésico de referência para o monitoramento dinâmico de pontes. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

Veiga, L. A. K. Automação Topográfica apostila parte 01. Curitiba, 2006.

Vitório, J. A. P. Pontes metálicas e mistas. Tópicos de conservação, danos e reforços estruturais. Recife, 2015.

Vitório, J. A. P. Vistorias, Conservação e Gestão de Pontes e Viadutos de Concreto. Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro, 2006.