



Análise do Desempenho de ETR no Monitoramento Dinâmico de Estrutura Metálica por Leitura Contínua de Direções

Performance Evaluation of a Robotic Total Station in the Dynamic Monitoring of Metallic Structures by Continuous Direction Measurements

Leandro Ítalo Barbosa de Medeiros¹, Pedro Luís Faggion² e Samir de Souza Oliveira Alves³

1 Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil. leandro.medeiros@ufpr.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0437-1269>

2 Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil. pedro.faggion@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4881-8720>

3 Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil.
samirsoalves@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3083-0681>

Recebido: 02.2020 | Aceito: 03.2020

Resumo: As obras de infraestrutura estão sujeitas às ações de forças estáticas, geralmente relacionadas ao peso do próprio corpo estrutural, e a forças dinâmicas, oriundas da ação de agentes externos à estrutura, como o vento e outras cargas móveis. O monitoramento dinâmico de estruturas é realizado, comumente, com utilização de instrumentais não geodésicos, como acelerômetros e extensômetros. Contudo, este artigo apresenta uma alternativa de técnica geodésica para o monitoramento dinâmico de estruturas por meio da análise do desempenho de uma estação total robotizada (ETR) utilizando Leitura Contínua de Direções (LCD), uma metodologia capaz de aumentar a taxa amostral do equipamento para cerca de 20 Hz, além de eliminar a latência entre as medições lineares e angulares. Os experimentos foram realizados em um ponto materializado sobre a passarela que liga os campi Centro Politécnico e Botânico da Universidade Federal do Paraná. Os dados oriundos da ETR foram comparados aos obtidos com levantamento *Global Navigation Satellite System* (GNSS) no modo relativo cinemático contínuo com frequência de 20 Hz.

Palavras-chave: Monitoramento Dinâmico. Estação Total Robotizada. Leitura Contínua de Direções.

Abstract: Infrastructure constructions are subject to the actions of static forces, which are related to the weight of the structural body itself, and dynamic forces, such as the action of external agents in the structure, such as wind and other moving loads. Dynamic monitoring of structures is commonly performed by using geotechnical instruments, as accelerometers and extensometers. However, this paper presents an alternative geodetic technique for the dynamic monitoring of structures by performing performance analysis of a robotic total station using Continuous Direction Measurements, a methodology capable of duplicate the sampling rate of the equipment. The experiments were carried out at a fixed point on the metal walkway that connects the campus Polytechnic and Botanical of the Federal University of Paraná. The data collected from the robotic total station were compared to that with GNSS survey in continuous kinematic relative mode with frequency of 20 Hz.

Keywords: Dynamic Monitoring. Robotic Total Station. Continuous Directions Measurement.

1 INTRODUÇÃO

Grandes obras de arte especiais tais como pontes e viadutos, e obras hidráulicas como barragens, canais, estações elevatórias hidroviárias, portos, eclusas e outras, representam uma das maiores parcelas de investimento de recursos públicos. Segundo Bueno (2007), a importância da aplicação de verbas nestas estruturas está atrelada ao fato de tais obras serem utilizadas para viabilizar o transporte de pessoas, insumos, produção, a manufatura de bens, proporcionar a geração de energia e ainda para a proteção da sociedade contra desastres naturais, como as rápidas e volumosas cheias, além de possuírem alta relevância na defesa

do território. Xu e Hu (2009a) destacam que, além do fator econômico, a constante manutenção das grandes estruturas se faz necessária devido a causas ambientais e sociais. A ocorrência de anomalias estruturais implica em riscos à vida humana e ao meio ambiente, muitas vezes com consequências irreversíveis. Deste modo, as realizações de vistorias periódicas de tais estruturas assim como o monitoramento destas obras são tidas como atividades fundamentais.

Do ponto de vista estrutural, construções estão sujeitas às ações de forças estáticas, geralmente relacionadas ao peso do próprio corpo estrutural; e a forças dinâmicas, oriundas da ação de agentes externos à estrutura, como o vento e outras cargas móveis como: pedestres caminhando sobre passarelas (MOSCHAS; STIROS, 2013); tráfego de veículos em pontes e viadutos (LEE et al., 2019), torcida em arquibancada de estádio (DIORD et al., 2017), movimentação de massa d'água em barragens (LIN et al., 2018); eventos sísmicos (SHAN; OUYANG; SHI, 2018), dentre outros. Larocca (2004) expõe que os deslocamentos dinâmicos são caracterizados pela direção de movimento, comportamento temporal e por sua amplitude, que variam dependendo da carga, do material e da dimensão dos componentes do corpo estrutural.

A NBR 6118 de 2004 apresenta que cargas dinâmicas podem acarretar: estados limites últimos, caracterizados como os relacionados ao colapso ou outra forma de ruína que determine a interdição da estrutura; estados limites de utilização, ocasionados por vibração excessiva, os quais ocorrem quando a frequência da própria estrutura está próxima à frequência considerada crítica; e ainda a fadiga dos materiais, a qual se associa a ações dinâmicas repetidas, e ativam o processo de modificação progressiva e permanente da estrutura de um material. Como um modo de manutenção preventiva, desde a construção e perdurando por toda a vida útil, é importante que sejam realizados trabalhos de monitoramento da estrutura, destacando-se o monitoramento dinâmico (ABNT, 2004).

O monitoramento de estruturas com carga dinâmica pode ser subdividido em dois grupos: o monitoramento geotécnico, ou não geodésico, onde são empregados geralmente equipamentos tais como transdutores de deslocamento, extensômetros, entre outros; e o monitoramento geodésico, onde são utilizados métodos e instrumentais geodésicos, como GNSS e estações totais robotizadas (LAROCCA, 2004; DA CRUZ, 2015). Apesar de existirem algumas vantagens em comparação aos métodos geodésicos, por exemplo, equipamentos com menor custo financeiro, os métodos geotécnicos apresentam observáveis locais e não conectadas geometricamente, ou seja, a análise da tendência global das deformações se faz mais complexa (BUENO, 2007; KUANG, 1996), diferentemente do monitoramento geodésico, o qual avalia deslocamentos de pontos localizados no corpo monitorado referenciados a um sistema de coordenadas externo à estrutura. De todo modo, os custos do monitoramento estrutural são pequenos quando comparados ao custo de uma grande obra, geralmente inferiores a um por cento (LAROCCA, 2004; ROBERTS; MENG; DODSON, 2001).

Os avanços tecnológicos na área das ciências geodésicas têm impactado positivamente a evolução dos equipamentos e *softwares*, resultando em trabalhos cada vez mais precisos e com um tempo necessário de execução cada vez menor. Com isso, tem ocorrido uma evolução das estações totais, que já trabalham de maneira robotizada, com uma intervenção mínima do operador, e com sistemas de *hardware* e *software* que vêm apresentando uma crescente melhora no que diz respeito a suas precisões nominais e praticidade na obtenção dos dados. A utilização de estações totais no monitoramento dinâmico de estruturas se deu com a implementação dos sistemas de reconhecimento automático de alvos (EHRHART; LIENHART, 2015; RADOVANOVIC; TESKEY, 2001), sendo limitado, até então, por dois principais fatores. O primeiro é capacidade de rastreamento menor que 10 Hz, o que restringe sua aplicação a estruturas com frequências de vibração não maiores de 5 Hz. O segundo é a assincronia entre as coletas de observações angulares e lineares dos equipamentos (COSSER et al., 2003; EHRHART; LIENHART, 2015; PALAZZO, 2009; XU; HU, 2009a)

No entanto, para alguns tipos de estruturas, como no caso de pontes e passarelas, medições constantes de distâncias não se fazem necessárias. Isso se justifica no fato de que, de acordo com diversos estudos, movimentações no sentido longitudinal de tais estruturas não são perceptíveis (BESHR; KALOOP, 2013).

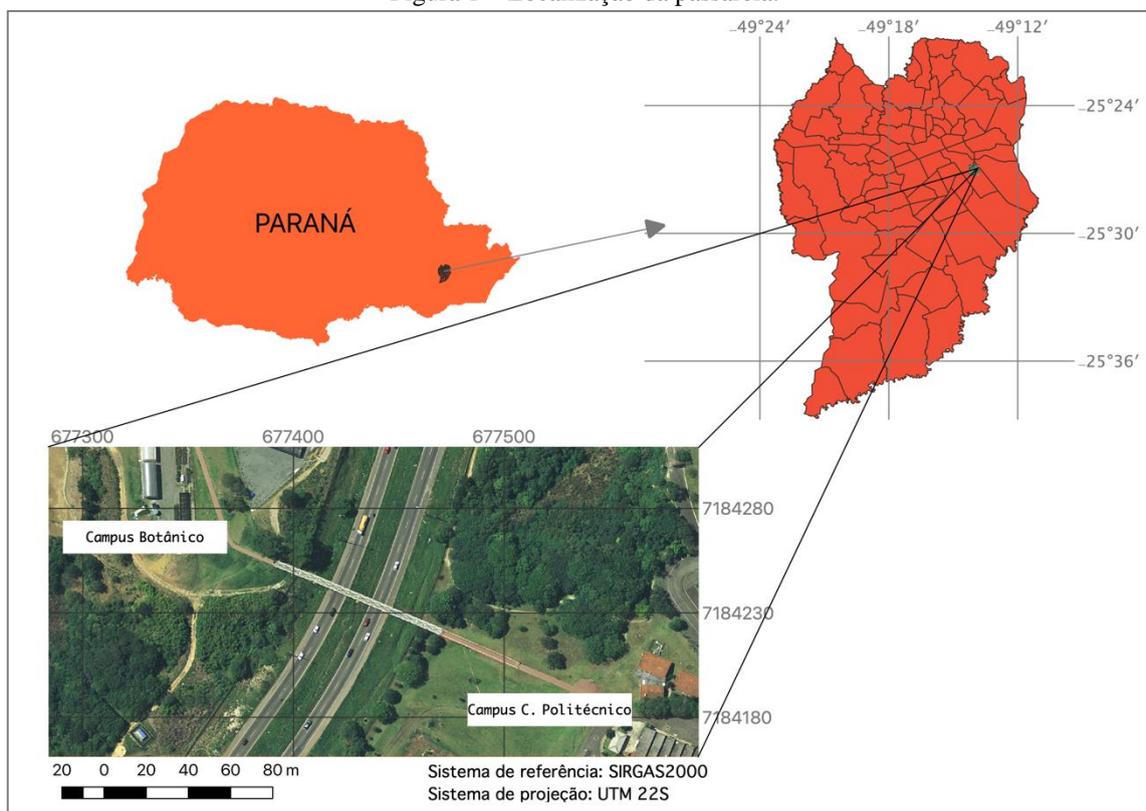
Com isso, este artigo avalia o desempenho de uma estação total robotizada para o monitoramento

dinâmico de uma estrutura utilizando a leitura contínua de direções. Utilizando uma distância horizontal inicial, é possível determinar os deslocamentos verticais e transversais do corpo monitorado. Neste estudo, avaliou-se uma passarela metálica apenas pela variação angular da direção da luneta do equipamento, buscando assim eliminar a assincronia entre as leituras lineares e angulares, assim como o ganho de velocidade de obtenção de dados pelo equipamento. Ao final, os resultados obtidos foram comparados aos de um levantamento GNSS realizado simultaneamente.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em um ponto fixado sobre a estrutura da passarela metálica que liga os campi Centro Politécnico e Botânico, da Universidade Federal do Paraná, na Cidade de Curitiba. Utilizou-se o pilar P1000 sobre o Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia – LAGEH, como ponto de base GNSS e ponto de orientação da ETR. A Figura 1 apresenta a localização dos experimentos.

Figura 1 – Localização da passarela.

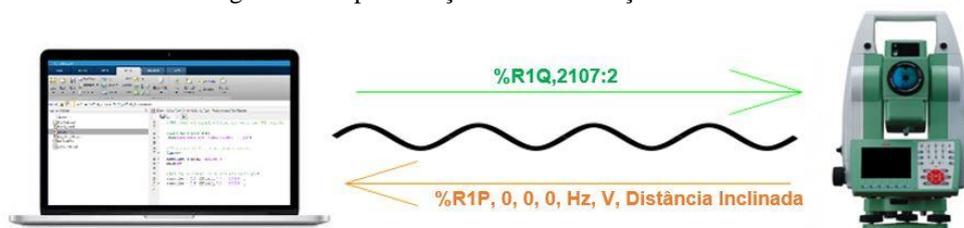


Fonte: Os autores (2020).

Utilizou-se uma estação total robotizada modelo Leica TS15, a qual possui precisão linear de \pm (1mm + 1,5 ppm) e precisão angular de 1". Para o uso deste equipamento no monitoramento dinâmico de estruturas em altas taxas de rastreamento, faz-se necessária a utilização de um controlador externo pois, em suas configurações originais, o equipamento opera na frequência aproximada de 1 Hz quando em modo cinemático.

Os equipamentos Leica utilizam um protocolo de comunicação específico, o GeoCOM®. Este protocolo é responsável pela comunicação do equipamento com um controlador externo, possibilitando o fluxo de informações via porta serial, por meio de um cabo RS232 ou por *bluetooth*. Segundo Rodriguez e Veiga (2019), o sistema opera baseado no conceito “servidor – usuário”, em que o intercâmbio de informações é caracterizado no formato ASCII. A comunicação entre o computador e a estação total ocorre por meio do envio e recebimento de *streams*. Neste processo, as mensagens enviadas pelo computador são codificadas com as iniciais “%R1Q”, e as respostas, enviadas pelo equipamento, são codificadas com as iniciais “%R1P”, como na Figura 2.

Figura 2 – Representação da comunicação GeoCOM.



Fonte: Os autores (2020).

Por se tratar de um experimento que exige um fluxo de dados contínuo, com consistência e o mínimo de interrupções possíveis, optou-se pela comunicação via cabo serial. Assim, utilizou-se um cabo modelo RS232 como caminho do fluxo de dados. Desta maneira, implementou-se uma rotina em ambiente matlab para a coleta e processamento dos dados.

Em laboratório, realizaram-se alguns experimentos e verificou-se que a taxa de coleta do equipamento para a leitura contínua de direções se situa predominantemente acima de 19 Hz, mas com intervalos variados. Apesar disto, esta taxa amostral é 2 vezes superior à encontrada em estudos que utilizaram a maneira convencional, com leituras simultâneas de direções e distâncias (PALAZZO, 2009; XU; HU, 2009a).

Como parâmetro de comparação para os deslocamentos encontrados nos experimentos de campo, realizou-se simultaneamente um levantamento GNSS, modo relativo, com levantamento estático e processamento cinemático. Para tanto, utilizou-se um par de receptores GS15, com frequência amostral de 20 Hz. Os dados foram processados com uso do *software* Leica Infinity, com licença *float* da UFPR.

Para o levantamento simultâneo, utilizou-se um suporte desenvolvido por Palazzo (2009), onde foram fixados tanto o prisma refletor GPR111 quanto a antena GNSS *rover*, como visto na Figura 3.

Figura 3 – Suporte para prisma e antena GNSS sobre base nivelante.



Fonte: Os autores (2020).

A montagem do conjunto sobre a estrutura se deu com fixação um parafuso universal de centragem forçada, como visto na Figura 4.

Figura 4 – Parafuso de fixação do conjunto de monitoramento.



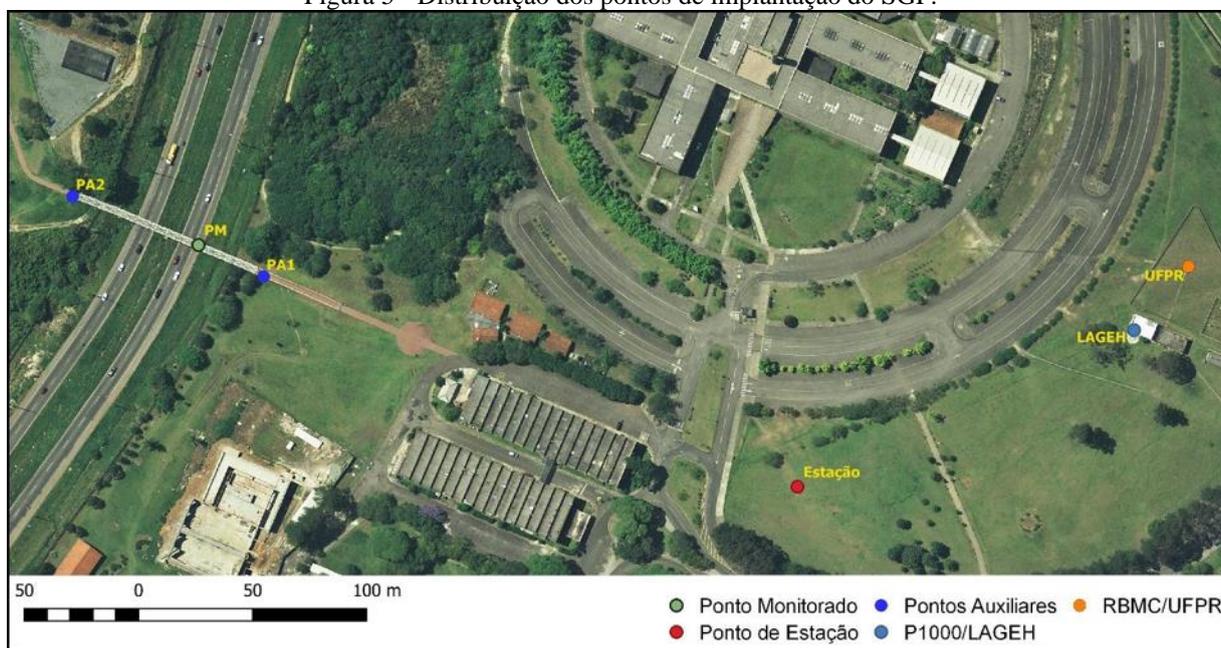
Fonte: Os autores (2020).

2.1 Sistema Geodésico de Referência da Estrutura

A análise dos deslocamentos e frequências de vibração da estrutura foram realizados com relação ao eixo transversal e ao eixo vertical da passarela. Assim, implementou-se um sistema de referência capaz de indicar a magnitude dos deslocamentos sofridos pela estrutura nas direções mais perceptíveis do corpo monitorado. Ainda, este sistema local possibilitou a compatibilização entre os dados obtidos com a ETR e os dados oriundos do levantamento GNSS, para posterior verificação.

A implementação do sistema local foi iniciada com o levantamento por GNSS e com estação total de dois pontos auxiliares (PA1 e PA2) em ambas as extremidades de entrada da estrutura, lado Politécnico e lado Botânico, de modo que a reta que passa por estes dois pontos é paralela ao eixo de caminhamento da passarela. Um terceiro ponto foi utilizado como estação de monitoramento (Estação), situado no gramado do centro politécnico, e utilizou-se ainda o pilar P1000 (LAGEH), sobre o Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrologia como ponto de orientação para a estação total e também como ponto da base GNSS para os levantamentos durante o experimento. O esquema de distribuição dos pontos, incluindo o ponto monitorado (PM), é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Distribuição dos pontos de implantação do SGP.



Fonte: Os autores (2020).

Os pontos citados foram levantados por GNSS, com rastreamento aproximado de 2 horas por ponto. Tendo em vista que a linha de base, partindo da estação UFPR da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC-UFPR), é inferior a 400 metros para todos os pontos, e que as condições de rastreamento eram boas, garantiu-se uma precisão submilimétrica para cada um destes pontos, (SEEBER, 2003). A Tabela 1 apresenta as coordenadas geodésicas elipsoidais em SIRGAS2000, época 2000.4, dos pontos auxiliares utilizados no experimento.

Tabela 1 – Coordenadas em SIRGAS2000, época 2000.4, dos pontos utilizados no experimento.

Pontos	Latitude	Longitude	h (m)
LAGEH	25°26'55,06" S	49°13'52,31" O	927,258
Monitorado	25°26'54,06" S	49°14'06,96" O	914,856
Estação	25°26'57,75" S	49°13'57,05" O	916,891
PA1	25°26'54,45" S	49°14'05,99" O	912,439
PA2	25°26'53,37" S	49°14'08,92" O	912,074

Fonte: Os autores (2020).

A transformação entre os sistemas geodésicos global e local se deu pela implementação de rotinas

em ambiente matlab, seguindo os procedimentos matemáticos descritos por Andrade (2003). Adotou-se o ponto PA1 como origem do sistema, e obteve-se então as coordenadas locais.

O ângulo de rotação (θ) entre os sistemas SGL e o Sistema Geodésico da Passarela foi de $67^{\circ}54'15''$, positivo no sentido anti-horário. Com a finalidade de eliminar valores negativos para as coordenadas no SGP, foram somados 1000 m, 500 m e 100 m às coordenadas x, y e z da origem, respectivamente, o que resultou nas seguintes coordenadas para os pontos no sistema da estrutura, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Coordenadas dos pontos no sistema geodésico da passarela.

Ponto	x (m)	y (m)	z (m)
LAGEH	1126,390	138,749	114,807
Monitorado	1000,925	529,629	102,417
Estação	999,861	230,334	104,446
PA1	1000,000	500,000	100,000
PA2	1000,000	588,363	99,634

Fonte: Os autores (2020).

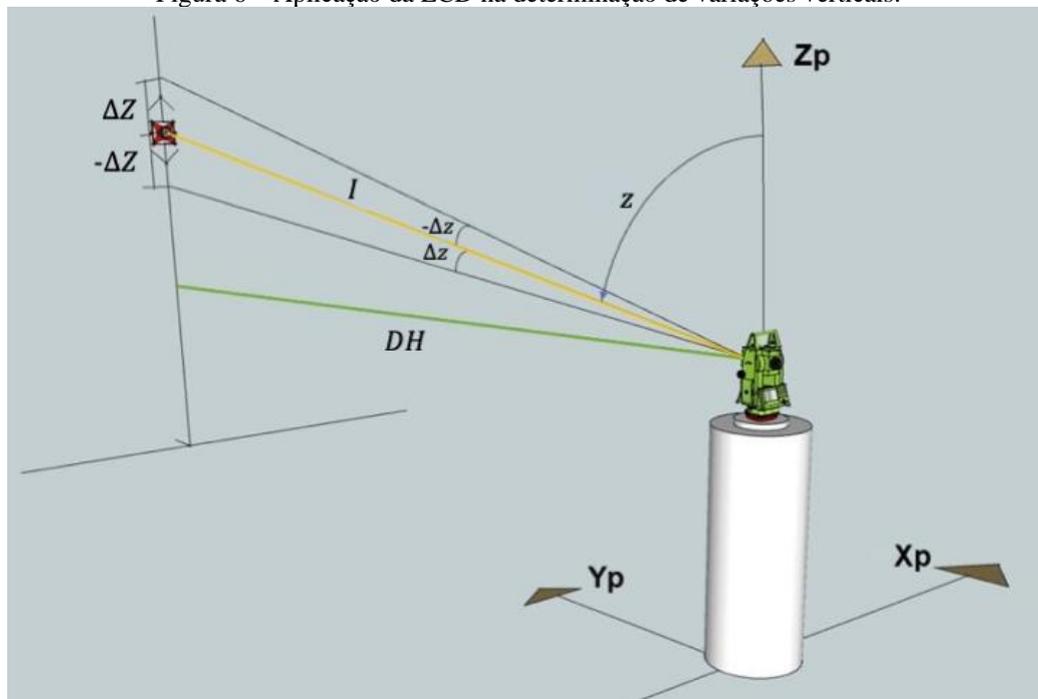
De posse dos parâmetros de transformação entre os sistemas geodésico global e geodésico da estrutura, fez-se possível a realização do experimento dinâmico.

2.2 Leitura Contínua de Direções

A metodologia aqui intitulada de Leitura Contínua de Direções (LCD) consiste no uso de uma ETR para a coleta contínua de direções horizontais e ângulos verticais referentes ao rastreamento de um alvo no modo *lock* de estações totais robotizadas. A utilização desta metodologia possibilita a determinação de variações posicionais horizontais e verticais, partindo-se de uma distância horizontal inicial fixada, a qual é obtida pela horizontalização de uma distância inclinada corrigida dos fatores atmosféricos e da curvatura terrestre. Em outras palavras, as variações posicionais são calculadas em função das projeções formadas pelas variações angulares, tendo como referência a direção angular média do conjunto.

Na Figura 6 é possível visualizar a aplicação da metodologia para variações verticais.

Figura 6 – Aplicação da LCD na determinação de variações verticais.



Fonte: Os autores (2020).

Na figura, DH é a distância horizontal fixada e z é o ângulo zenital médio de referência. Assim, o cálculo das variações verticais é executado através da Eq. (1):

$$\Delta Z = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (DH/\tan(z_i))}{n} \right] - \frac{DH}{\tan(z_i)} \Big|_{i=1}^n \quad (1)$$

em que n é número de leituras do bloco. O mesmo procedimento se dá para variações horizontais, como visto na Eq. (2):

$$\Delta X = \pm [\tan(Hz_i - \overline{Hz})]_{i=1}^n DH \quad (2)$$

em que \overline{Hz} é a direção horizontal média do conjunto de leituras, e Hzi representa cada um dos ângulos horizontais medidos no conjunto de leituras.

2.3 Experimento de campo

Como observado na Figura 4, o ponto de Estação foi locado de maneira a compreender um prolongamento do eixo longitudinal da estrutura. O local foi escolhido de maneira a maximizar a performance do método. Cabe ressaltar que estudos já realizados indicam que variações longitudinais são praticamente imperceptíveis em estruturas como pontes e viadutos.

O experimento foi realizado em uma terça-feira, durante o período letivo, em um dia de fluxo intenso de pedestres atravessando entre os dois campi, além do fluxo de veículo trafegando na Linha Verde, parte da BR-476, sobre a qual a passarela transpassa, com o intuito de analisar o desempenho da metodologia em estudo para a ETR no monitoramento do comportamento do ponto durante um dia normal de uso da estrutura.

O intervalo entre a primeira e a última coleta de dados com ETR foi de aproximadamente 30 minutos, objetivando minimizar a influência das variações das características ambientais.

Inicialmente, após a devida instalação e calagem do equipamento no ponto de estação, orientou-se a ETR utilizando um prisma fixado sobre o pilar P1000, no LAGEH, o mesmo onde, em seguida, foi instalada a base GNSS. Realizaram-se então três séries de leituras, em posição direta e inversa da luneta. Após este procedimento, o equipamento ficou em *standby* enquanto ocorria a inicialização do GNSS base e *rover* (Figura 7). A inicialização durou aproximadamente 25 minutos com a finalidade de solucionar as ambiguidades anteriormente ao início do experimento.

Figura 7 – Receptor GNSS *rover* e prisma GPR111 sobre a estrutura.



Fonte: Os autores (2020).

Após a inicialização do GNSS, deu-se início ao monitoramento com a ETR, visou-se o prisma sobre a estrutura e realizou-se a medida da distância, e então ativou-se o modo *lock*, prosseguindo-se com as

coletas dos blocos de dados de leituras angulares. Ao todo, foram coletados 4 blocos de dados, cada um contendo 512 leituras, resultando em aproximadamente 25 segundos por coleta. Os blocos são relativos a quantidades e direções de caminhamento distintos de pessoas, como apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coordenadas dos pontos no sistema geodésico da passarela.

Bloco	Sentido	
	Politécnico/Botânico (Pessoas transitando)	Botânico/ Politécnico (Pessoas transitando)
1	0	9
2	0	0
3	10	8
4	5	3

Fonte: Os autores (2020).

A quantidade de leituras, uma potência de base 2, foi escolhida em função de uma posterior utilização dos dados para aplicação na análise de frequência de vibração por transformada de Fourier (BOLSAN, 2006). Desconsiderou-se aqui a variação de massa entre os indivíduos. A Figura 8 apresenta uma imagem tomada através da luneta do equipamento durante o experimento.

Figura 8 – Vista através da luneta da ETR.



Fonte: Os autores (2020).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No teste realizado, a distância horizontal entre o Ponto de Estação e o Ponto Monitorado foi 299.177 m, com ângulo zenital médio de $90^{\circ}27'09''$, e direção horizontal média igual a $234^{\circ}14'05''$. Com estes dados, calculou-se a precisão dos pontos por propagação de covariâncias (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015), e obteve-se os valores de 0,8 mm para as variações horizontais e 1 mm para as variações verticais. Nos gráficos a seguir, as linhas pontilhadas em vermelho apresentam a precisão das observações.

As figuras de 9 a 16 apresentam os gráficos obtidos do processamento dos 4 blocos de dados coletados com a ETR, apresentando o comportamento do ponto monitorado nos sentidos vertical e transversal da estrutura para 512 leituras. Nestes gráficos, os valores negativos assinalam a ocorrência de deslocamentos para baixo na avaliação referente ao eixo vertical, e para o lado direito do observador nos gráficos referentes as análises dos deslocamentos transversais. O zero indica a posição do ponto quando considerado em repouso. Na Figura 9 e Figura 10, têm-se os resultados de variações posicionais para os bloco 1 de leituras, em que 13 pessoas atravessavam a estrutura.

Figura 9 – Deslocamentos verticais obtidos no bloco 1 do experimento.



Fonte: Os autores (2020).

Figura 10 – Deslocamentos transversais obtidos no bloco 1 do experimento.



Fonte: Os autores (2020).

Da análise dos gráficos, verifica-se que os deslocamentos estiveram, na maior parte, acima da incerteza posicional calculada para o método, com deslocamento máximo de -8,7 mm. Observa-se ainda que houve uma perda de comunicação entre o equipamento e o prisma logo após os 25 segundos de experimento, possivelmente ocasionada pela passagem de algum pássaro, ou outro obstáculo, o que resultou na inserção de leituras errôneas.

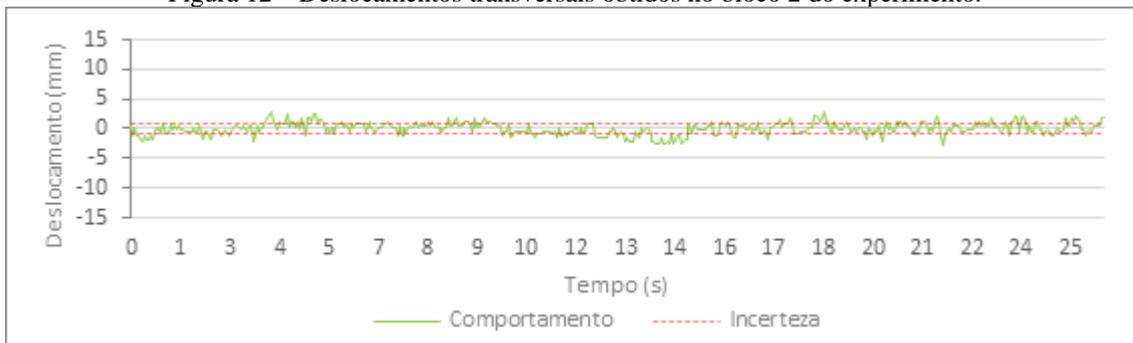
As Figuras 11 e 12 apresentam os resultados obtidos para o bloco 2 do experimento, momento em que a estrutura se encontrava vazia.

Figura 11 – Deslocamentos verticais obtidos no bloco 2 do experimento.



Fonte: Os autores (2020).

Figura 12 – Deslocamentos transversais obtidos no bloco 2 do experimento.



Fonte: Os autores (2020).

Os gráficos resultantes do bloco 2 indicam uma condição aproximada de repouso da estrutura, o que condiz com o esperado. Tendo em vista que não havia pessoas trafegando sobre a passarela no momento da tomada de observações, esperava-se que as leituras indicassem variações dentro do nível de precisão calculada para o método. Os picos maiores que a incerteza, possivelmente, foram ocasionados pelos deslocamentos oriundos das forças de ventos ou pela passagem de veículos sob a estrutura monitorada. Tais resultados corroboram para uma confiabilidade no método adotado, indicando que os picos nos gráficos realmente apontam para variações posicionais, e não somente ruídos de observação.

Nas Figuras 13 e 14 apresenta-se o comportamento do ponto monitorado durante o terceiro bloco do experimento, quando a estrutura esteve sujeita a esforços dinâmicos advindos do tráfego de pessoas caminhando em ambas as direções da passarela.

Figura 13 – Deslocamentos verticais obtidos no bloco 3 do experimento.



Fonte: Os autores (2020).

Figura 14 – Deslocamentos transversais obtidos no bloco 3 do experimento.

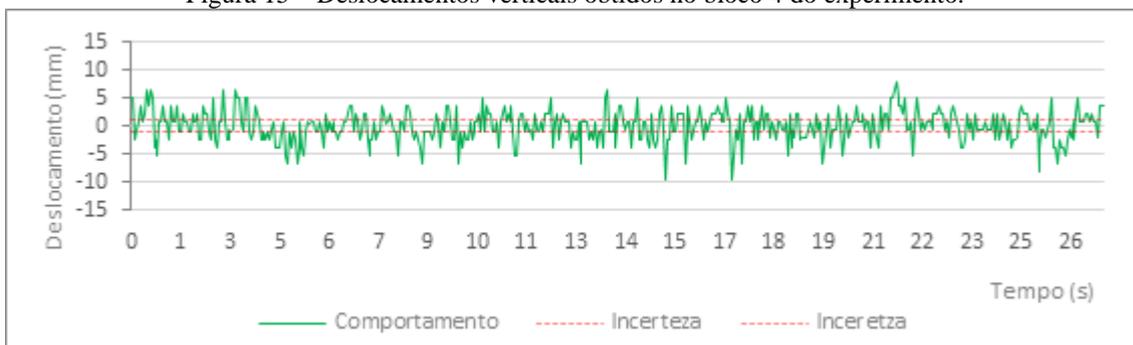


Fonte: Os autores (2020).

Observa-se a presença de diversos picos de mínimo ao se analisar o gráfico de deslocamentos verticais do bloco 3, sendo alguns superiores a 1 cm, o que condiz com o esperado, tendo em vista que este foi o bloco com maior quantidade de pessoas, e com momentos distintos de passagens no ponto monitorado. Neste bloco, a variação transversal máxima apresentada está localizada no momento em torno de 16 segundos, quando também houve um pico na variação vertical, o que indica uma correlação entre as variações vertical e transversal, sendo esta correlação também vista nos demais blocos.

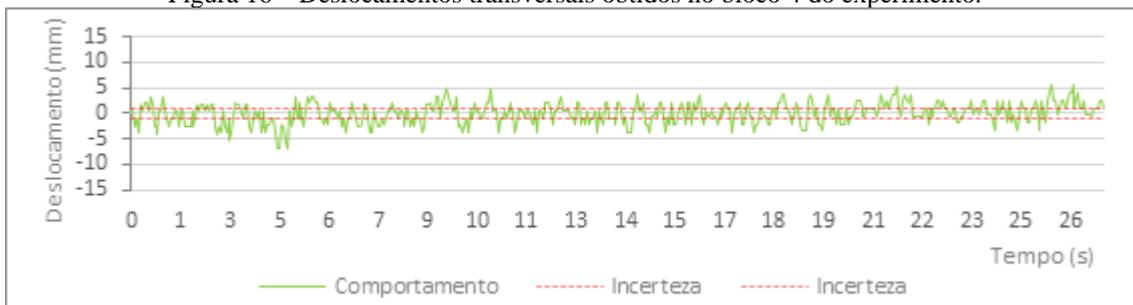
As Figuras 15 e 16 apresentam o comportamento do ponto monitorado no bloco 4 do experimento, quando a passarela esteve sujeita a esforços advindos do tráfego de pessoas em ambos os sentidos da passarela, mas em quantidade aproximadamente igual à metade de pessoas presentes no terceiro bloco.

Figura 15 – Deslocamentos verticais obtidos no bloco 4 do experimento.



Fonte: Os autores (2020).

Figura 16 – Deslocamentos transversais obtidos no bloco 4 do experimento.

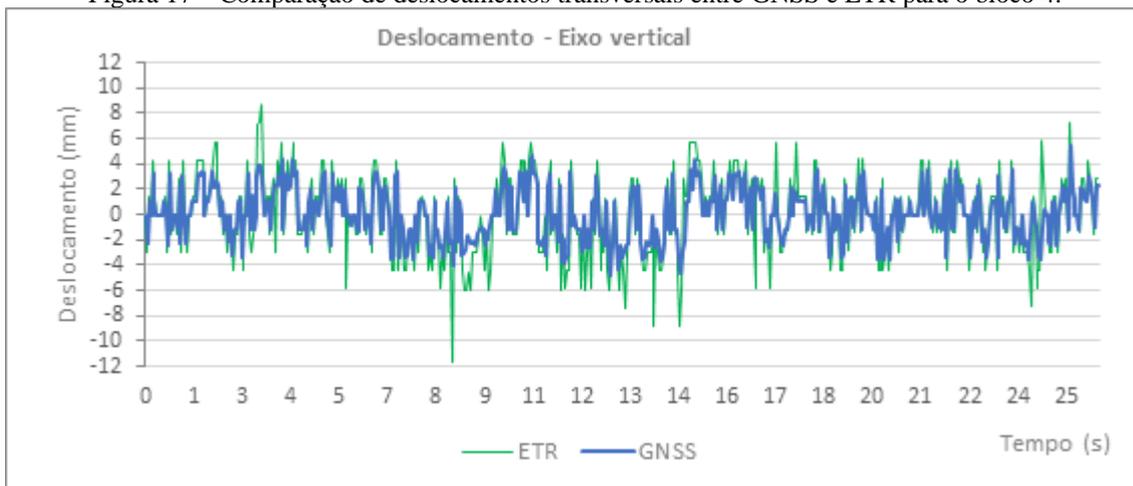


Fonte: Os autores (2020).

No quarto bloco, os resultados apontaram deslocamentos verticais máximos de 9 mm e deslocamentos transversais máximos de 7 mm, aproximadamente 25% inferiores aos detectados no terceiro bloco.

Realizou-se a comparação dos resultados obtidos dos deslocamentos do ponto monitorado com estação total robotizada aos resultados obtidos com GNSS no modo relativo cinemático. Observou-se que os resultados provenientes do GNSS, provavelmente por se utilizar um software comercial, apresentam uma suavização sobre os picos de deslocamento, como visto na Figura 17, o que acaba dificultando a detecção dos picos reais de deslocamento.

Figura 17 – Comparação de deslocamentos transversais entre GNSS e ETR para o bloco 4.



Fonte: Os autores (2020).

Como observado da Figura 17, o processamento GNSS apresenta resultados suavizados quando comparado aos obtidos com a ETR. Tal fato pode ser justificado, possivelmente, por algum algoritmo implementado na rotina de processamento do software Leica Infinity, tendo em vista que este não apresenta uma função específica para monitoramento dinâmico a altas taxas de rastreamento. No entanto, de modo geral, excetuando-se os picos maiores, o comportamento do ponto para ambas as técnicas apresenta um gráfico

majoritariamente sobreposto.

4 CONCLUSÃO

A técnica intitulada Leitura Contínua de Direções apresentou-se como uma alternativa eficiente para o uso de estações totais robotizadas no monitoramento dinâmico de estruturas. O ganho na taxa amostral, elevada para em torno de 20 Hz, assim como a exclusão do efeito da latência, representa um avanço na utilização de tais equipamentos para esta finalidade, aumentando ainda as possibilidades de estruturas passíveis de monitoramento dinâmico com ETR.

A detecção de deslocamentos no nível da precisão do método com a estrutura vazia corroborou para uma maior confiabilidade no método, indicando que os resultados encontrados são condizentes a deslocamentos reais e não a ruídos.

Os deslocamentos encontrados para os distintos blocos de leituras foram proporcionais à quantidade de pessoas trafegando sobre a passarela em estudo. Corroborando, também, para uma confiabilidade no método.

Ainda, a implementação do sistema geodésico local, o sistema da estrutura, com eixos orientados de acordo com os eixos longitudinal e transversal da passarela, possibilitou a análise dos deslocamentos da estrutura de acordo com os sentidos mais representativos desta, além de possibilitar a comparação dos resultados obtidos da ETR com os obtidos do GNSS.

Em comparação aos resultados obtidos do GNSS, os dados obtidos do levantamento com ETR apresentaram picos mais acentuados de variações posicionais. Sendo este fato ocasionado provavelmente pela presença de algum algoritmo suavizador no programa de processamento dos dados GNSS.

Agradecimentos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pós-graduação nível de mestrado por meio do processo 88882.461738/2019-01.

Contribuição dos Autores

A metodologia do trabalho foi definida em conjunto entre os autores. O autor Leandro Medeiros participou na conceitualização, curadoria dos dados, desenvolvimento do software e redação. O autor Pedro Luis Faggion participou na análise formal, supervisão e redação. O autor Samir Alves participou na curadoria dos dados, análise formal e investigação.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: SBEE, 2003.

ARAÚJO NETO, J. O. D. A. **Uso do GPS no monitoramento dinâmico da infraestrutura de transportes: pontes rodoviárias em concreto**. 2017. 201 f. Tese (Doutorado em Transportes) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

BESHR, A. A. E.; KALOOP, M. R. Monitoring Bridge Deformation Using Auto-Correlation Adjustment

- Technique for Total Station Observations. **Positioning**, v. 04, n. 01, p.1-7, 2013. Scientific Research Publishing, Inc., DOI. 10.4236/pos.2013.41001.
- BOLZAN, M. J. A. Transformada em ondeleta: Uma necessidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 4, p. 563–567, 2006.
- BUENO, R. F. **Monitoração, por GPS, de deslocamento em estruturas com carga dinâmica**. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- RODRIGUEZ, F. A. C.; VEIGA, L. A. K. Desenvolvimento de Interface para Automação da Coleta de Temperatura Baseada em Redes Multiestação Aplicada ao Monitoramento de Estruturas Empregando-se Estações Totais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, p. 781-805, 25 set. 2019.
- COSSER, E. et al. Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station. In: FIG SYMPOSIUM ON DEFORMATION MONITORING, 11., 2003. Santorini. **Proceedings...** Grécia: International Federation of Surveyors, 2003.
- DA CRUZ, W. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas**. Estudo de caso: uhe mauá. 2015. 146 f. (Doutorado em Ciências Geodésicas) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- DIORD, S. et al. Automated modal tracking in a football stadium suspension roof for detection of structural changes. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 24, n. 11, 7 mar. 2017. Wiley. DOI. 10.1002/stc.2006.
- EHRHART, M.; LIENHART, W. Monitoring of Civil Engineering Structures using a State-of-the-art Image Assisted Total Station. **Journal of Applied Geodesy**, v. 9, n. 3, p. 174–182, 2015. DOI. 10.1515/jag-2015-0005.
- GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicação geodésicas**. 2º ed. Curitiba: Editora UFPR, 2015.
- KUANG, S. **Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications**. Chelsea Michigan: Ann Arbor Pr Inc, 1996.
- LAROCCA, A. P. C. **O uso do GPS como instrumento de controle de deslocamentos dinâmicos de obras civis** – aplicação na área de transportes. Tese (Doutorado em Transportes) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2004.
- LEE, J. et al. Long-term displacement measurement of bridges using a LiDAR system. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 26, n. 10, p. 1–15, 2019. DOI. 10.1002/stc.2428.
- LIN, Chaoning et al. A deformation separation method for gravity dam body and foundation based on the observed displacements. **Structural Control And Health Monitoring**, [s.l.], v. 26, n. 2, p.2304-0, 3 dez. 2018. Wiley. DOI. 10.1002/stc.2304.
- MOSCHAS, F.; STIROS, S. Noise characteristics of high-frequency, short-duration GPS records from analysis of identical, collocated instruments. **Measurement**, v. 46, n. 4, p.1488-1506, maio 2013. Elsevier BV. DOI. 10.1016/j.measurement.2012.12.015.
- PALAZZO, D. R. O uso de uma ETR associada a um sistema geodésico de referência para o monitoramento dinâmico de pontes. **Boletim de Ciências Geodesicas**, Curitiba, v. 15, no 4, p.699-700, out-dez, 2009. v. 15, no 4, p.699-700, out-dez, 2009.
- RADOVANOVIC, R. S.; TESKEY, W. F. Dynamic Monitoring of Deforming Structures: Gps Versus Robotic Tacheometry Systems. In: FIG INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DEFORMATION MEASUREMENTS, 10., 2001, California. **Proceedings...** California: International Federation of Surveyors, 2001.
- ROBERTS, G.; MENG, X.; DODSON, A. The use of kinematic GPS and triaxial accelerometers to monitor the deflections of large bridges. In: FIG INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DEFORMATION MEASUREMENTS, 10., 2001, California. **Proceedings...** California: International Federation of

Surveyors, 2001.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. 2nd ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SHAN, J.; OUYANG, Y.; SHI, W. Adaptive control of earthquake-excited nonlinear structures with real-time tracking on prescribed performance criteria. **Structural Control And Health Monitoring**, v. 25, n. 10, 10 ago. 2018. Wiley. DOI. 10.1002/stc.2247.

XU, C.; HU, Q. Dynamic structural monitoring using the kinematic positioning of a robotic total station. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENTS, 9., 2009a, Beijing. **Proceedings...** Beijing: NJ IEEE, 2009. 269-273.

Biografia do autor principal



Leandro Ítalo Barbosa de Medeiros, natural de Piripiri-PI. Engenheiro Cartógrafo e Agrimensor formado pela Universidade Federal do Piauí, com período sanduíche em *University of Colorado at Boulder*. Mestre em Ciências Geodésicas pelo Programa Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Pesquisador de nível doutorado do Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia da UFPR, onde atua em pesquisas de desenvolvimento de metodologias na automação dos levantamentos geodésicos com ênfase no monitoramento dinâmico de estruturas.



Esta obra está licenciado com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.