

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
SAMARA ZIMMERMANN**

**SISTEMA DE PESAGEM EM MOVIMENTO: LINHA DE INFLUÊNCIA
REAL E ANÁLISE DE TENSÕES DE UMA PONTE**

Florianópolis
2018

Samara Zimmermann

**SISTEMA DE PESAGEM EM MOVIMENTO: LINHA DE INFLUÊNCIA
REAL E ANÁLISE DE TENSÕES DE UMA PONTE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Rafael Holdorf Lopez, Dr.

Coorientador: Felipe Carraro

Florianópolis

2018

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina.

Arquivo compilado às 22:03h do dia 6 de dezembro de 2018.

Samara Zimmermann

Sistema de pesagem em movimento: linha de influência real e análise de tensões de uma ponte : / Samara Zimmermann; Orientador, Rafael Holdorf Lopez, Dr.; Coorientador, Felipe Carraro - Florianópolis, 22:03, 20 de novembro 2018.

66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Programa de Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Linha de influência. 2. Pesagem em movimento. 3. Algoritmo de moses 4. BWIM. 5. Pontes. I. Rafael Holdorf Lopez, Dr. II. Felipe Carraro I-II. Programa de Graduação em Engenharia Civil IV. Sistema de pesagem em movimento: linha de influência real e análise de tensões de uma ponte

CDU 02:141:005.7

SAMARA ZIMMERMANN

**SISTEMA DE PESAGEM EM MOVIMENTO: LINHA DE INFLUÊNCIA REAL
E ANÁLISE DE TENSÕES DE UMA PONTE**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de novembro de 2018.

Prof^a. Luciana Rohde, Dr^a.

Coordenadora do Programa de Graduação
em Engenharia Civil

Banca Examinadora:



Prof. Rafael Holdorf Lopez
Orientador

Universidade Federal de Santa
Catarina - UFSC

Eng. Felipe Carraro, Ms.

Coorientador
Universidade Federal de Santa
Catarina - UFSC

Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.

Universidade Federal de Santa
Catarina - UFSC

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que não mediram esforços para que eu realizasse meus sonhos. Às minhas irmãs, que me serviram de exemplo durante toda a minha vida. Ao meu sobrinho Miguel, que veio em forma de presente durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

À universidade, que por meio de seus alunos e professores me ensinou o que é ser humano e a respeitar as diversidades da vida. E também pela oportunidade de aprender esta profissão maravilhosa que é a Engenharia Civil.

Aos meus professores, por todo o conhecimento transmitido ao longo desses 5 anos. Em especial ao meu orientador Rafael, que me deixou livre para que eu desenvolvesse este trabalho no meu tempo e por sempre estar disponível para tirar minhas dúvidas. Ao meu co-orientador Felipe, pela parceria e por se mostrar sempre disposto a me ajudar.

Aos meus pais pela dedicação e compreensão das dificuldades que eu passei, por nunca deixarem de acreditar em mim.

Ao meu namorado Bruno, por todo o apoio emocional e incentivo nos piores e melhores momentos durante a faculdade, por compreender minha ausência ao me dedicar aos estudos e por me transformar em uma pessoa melhor.

Aos meus amigos de faculdade, por todo o companheirismo e senso de equipe nos estudos e realização de trabalhos, seminários e competições. Passar pela graduação sem vocês teria tornado tudo mais difícil.

*“Ninguém pode construir em teu lugar as pontes que precisarás
para atravessar o rio da vida - ninguém, exceto tu, só tu.”*
Friedrich Nietzsche

RESUMO

Devido à importância do sistema rodoviário brasileiro, que é o principal meio utilizado no escoamento de produção agrícola no país, e às incertezas de segurança estrutural relacionadas às obras de arte especiais que compõem esse meio de transporte, surgiu a necessidade de aprimorar as técnicas de avaliação dessas estruturas, assim como o controle de cargas dos veículos que nelas trafegam. O estudo de linhas de influência utilizando dados de pesagem em movimento supre essa necessidade e traz uma série de funcionalidades interessantes tanto para fins de análise estrutural como controle de tráfego. Dentre elas, a pesagem dos veículos que trafegam sobre essas estruturas, a caracterização do tráfego e a avaliação da capacidade de carga das mesmas. Neste trabalho foram descritas as metodologias por trás dessa tecnologia aplicadas em uma ponte já construída. O método de obtenção da linha de influência se dá a partir do Algoritmo de Moses, que transforma as deformações causadas pela passagem de um veículo em uma linha de influência de momentos fletores no ponto de instalação dos sensores. Essas deformações são medidas através de extensômetros e o sistema é calibrado a partir da passagem de um veículo de dimensões e pesos dos eixos conhecidos. A partir daí, é construída a linha de influência real que posteriormente pode ser utilizada para determinar os pesos dos eixos de qualquer veículo que trafegue sobre a estrutura. Ao fim do trabalho são realizadas diversas comparações entre as linhas de influência real e teórica da estrutura e também comparados os resultados provenientes de uma modelagem utilizando o método dos elementos finitos, apresentando resultados condizentes e próximos daqueles obtidos por meio do sistema de pesagem em movimento. Este trabalho também aborda os efeitos dinâmicos sobre a estrutura e quais as consequências da falta de manutenção na camada de pavimentação.

Palavras-chaves: Linha de influência. Pesagem em movimento. Algoritmo de moses BWIM. Pontes.

ABSTRACT

Due to the importance of Brazilian road system, which is the main outflow of agricultural production, and the structural safety uncertainty of bridges that make part of it, comes up the need to improve the evaluation techniques of that structures, as well as the control of vehicle axle loads that pass through them. The study of influence lines using weight in motion data supplies these needs and brings a lot of interesting features of structural analysis and traffic control. Among them, vehicle axle loads weighing, traffic characterization and load capacity evaluation of these structures. This work describes the methodologies behind this technology implemented in a real bridge. The method to obtain the influence line is by means of the Moses Algorithm, which convert the strains caused by a vehicle passing over the structure into a influence line for bending moment in the point of sensors installation. These strains are measured by strain gauges and the system is calibrated using vehicles with known dimensions and axle weights. Afterwards the real influence line is build and can be used to determine the axle weight of any vehicle. At the end of this term paper some comparisons are carried out between the real and theoretical influence lines and a model using the finite elements method that has provided agreeing results with the weigh in motion system. This term paper also covers the dynamic effects over the structure and what are the consequences by the lacking of maintenance in paving surface.

Keywords: Influence line. BWIM. Bridges. Weight-in-motion. Moses Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sensor Bending Plate	27
Figura 2 – Subdivisões do sistema WIM.	28
Figura 3 – Obtenção do momento fletor a partir da LI pra um veículo de 4 eixos	30
Figura 4 – Obtenção das leituras de deformação com a passagem do caminhão.	32
Figura 5 – Cargas axiais atuando sobre a ponte, distâncias L_i e ordenadas ℓ_i da LI.	33
Figura 6 – Exemplo de sinal elétrico obtido como resposta do extensômetro para caminhão de 3 eixos.	34
Figura 7 – Matriz A para um veículo de 3 eixos.	36
Figura 8 – Matriz A para veículo de 5 eixos.	39
Figura 9 – Sinais de sensores FAD.	40
Figura 10 – Vista lateral da ponte sobre o rio Lambari	43
Figura 11 – Seção transversal da superestrutura da ponte sobre o rio Lambari	43
Figura 12 – Localização das transversinas e sensores.	44
Figura 13 – Seção transversal das longarinas.	44
Figura 14 – Desnível na cabeceira da ponte.	45
Figura 15 – Instalação do sistema B-WIM.	46
Figura 16 – Linha de Influência por evento da Ponte Lambari	48
Figura 17 – Linha de Influência real da Ponte Lambari	49
Figura 18 – Filtragem do evento 1, longarina 4	50
Figura 20 – Comparação entre Linhas de Influência	50
Figura 19 – Linha de influência filtrada média	51
Figura 21 – Deformação específica - veículo de 3 eixos.	52
Figura 22 – Deformação específica - veículo de 5 eixos.	53
Figura 23 – Modelagem da laje, longarinas e transversinas	53
Figura 24 – Deformações específicas do modelo composto por laje, longarinas e poio de segundo grau	54
Figura 25 – Deformações específicas do modelo de laje, longarinas, transversinas, simplesmente apoiada	55
Figura 27 – Deformações específicas da longarina mais solicitada	55
Figura 26 – Deformações específicas do modelo de laje, longarinas, transversinas, engastada	56
Figura 28 – Deformações específicas da longarina mais solicitada	56
Figura 29 – Gráfico deformação específica ε x Velocidade	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos veículos de calibração	46
Tabela 2 – Máximos de deformação específica ε	57
Tabela 3 – Pesos dos eixos e PBT para o veículo de 3 eixos em kN	58
Tabela 4 – Pesos dos eixos e PBT para o veículo de 5 eixos em kN	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B-WIM	<i>Bridge Weigh-in-motion</i>
CIA	Coeficiente de Impacto Adicional
FAD	<i>Free of Axles Detector</i>
ISWIM	<i>International Society for Weigh in motion</i>
LI	Linha de Influência
MEF	Método dos Elementos Finitos
NOR BWIM	<i>Nothing On the Road Bridge Weigh In Motion</i>
OAE	Obras de Arte Especiais
PBT	Peso Bruto Total
WIM	<i>Weigh-in-motion</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Deformação específica
ε_j	Deformação específica da longarina j
l	Vetor que contém as ordenadas das linhas de influência
l_i	Ordenada da linha de influência abaixo do eixo i
$l_{(k-C_i)}$	Ordenada da linha de influência para o eixo i na leitura k
σ	Tensão
σ_j	Tensão atuante na longarina j
φ	Função erro
A	Matriz que depende dos valores dos pesos dos eixos
C_i	Número da leituras correspondente à distância do eixo i ao primeiro eixo
E	Módulo de elasticidade do material
f	Frequência de leituras em Hz
K	Número total de leituras
L_i	Distância entre o eixo i e o primeiro eixo
M	Vetor que depende dos pesos dos eixos dos veículos e das medidas de deformação
M_j	Momento fletor na longarina j
M_{SE}	Momento fletor solicitante experimental
M_{ST}	Momento fletor solicitante teórico
N	Número de eixos do veículo
P_i	Peso estático do eixo i
R	Número da leituras correspondente ao tamanho da estrutura
$s_{i,i+1}$	Espaçamento entre o eixo i e o eixo seguinte i+1
t	Tempo
v	Velocidade do veículo
W_j	Módulo elástico da seção transversal da longarina j

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS	25
1.1.1	Objetivo Geral	25
1.1.2	Objetivos Específicos	26
2	SISTEMAS DE PESAGEM EM MOVIMENTO	27
3	LINHA DE INFLUÊNCIA	29
3.1	ALGORITMO DE MOSES	29
3.1.1	Linha de Influência Real	35
3.1.2	Velocidade e espaçamento entre eixos	39
3.1.3	Peso dos eixos e peso bruto total	40
4	ESTUDO DE CASO: PONTE SOBRE O RIO LAMBARI	43
4.1	INSTRUMENTAÇÃO	45
4.2	TRATAMENTO DOS DADOS E CALIBRAÇÃO	46
4.2.1	Sentido de tráfego	47
4.2.2	Número de eixos	47
4.2.3	Peso bruto total	47
4.2.4	Desvio da média	48
4.3	LINHA DE INFLUÊNCIA REAL	48
4.4	MODELAGEM PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	51
4.5	INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE DEFEITOS NO PAVIMENTO E CABECEIRAS	53
4.6	ANÁLISE DA OBTENÇÃO DOS PESOS DOS EIXOS E PBT	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHO FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – RESTRIÇÕES DOS EVENTOS	65

1 INTRODUÇÃO

As pontes são estruturas de grande importância na sociedade pois permitem interligar ao mesmo nível pontos não acessíveis separados por obstáculos naturais, como por exemplo rios e vales, ou até mesmo artificiais, como é o caso dos viadutos que cruzam grandes rodovias. A tecnologia por trás dessas estruturas vêm evoluindo com o passar dos anos, com o surgimento de novas ferramentas disponíveis para projeto, materiais e técnicas de confecção e manutenção das mesmas.

Uma técnica de projeto e obtenção dos esforços muito conhecida entre os engenheiros civis é a Linha de Influência. A partir dela, admite-se que a estrutura está sujeita a cargas que se movimentam por todo o seu comprimento, diferentemente das cargas estáticas calculadas em projetos de estruturas comuns, como torres e edifícios por exemplo.

Apesar de ser um método muito eficiente no cálculo estrutural de pontes e viadutos, deve-se levar em consideração que pelas imprecisões dos métodos construtivos e dos efeitos do tempo e da fadiga nessas estruturas, a Linha de Influência (LI) real é diferente daquela calculada na fase de projeto. Além disso, segundo Junges et al. (9), o modelo de carga móvel utilizado no Brasil pouco mudou nos últimos quarenta anos. Em contrapartida, os veículos que trafegam nas rodovias brasileiras mudaram muito nas últimas décadas, ocorrendo um aumento na capacidade de carga desses veículos, em sua quantidade e no surgimento de novas classes.

Por este motivo, conhecer a real LI se torna importante pois auxilia na determinação da capacidade de carga atual da estrutura e consequentemente na avaliação da sua segurança, segundo os estudos de Giovannetti (5). Conhecer esta capacidade de carga se tornou uma necessidade, principalmente na concessão das Autorizações Especiais de Trânsito (AET), pois trata de veículos com dimensões e peso bruto total além do convencional.

Para determinar a Linha de Influência real da estrutura, utiliza-se a relação das deformações sofridas por esta, quando um veículo qualquer trafega sobre ela, com os momentos fletores resultantes das forças que geraram tais deformações. Essas deformações são obtidas através dos sinais de um sistema de pesagem em movimento (WIM), calibrado por um veículo pré definido, e calculadas por algoritmos específicos para este fim, como por exemplo, o algoritmo desenvolvido por Moses (10) que é utilizado neste trabalho.

Além disso, o trabalho aborda a precisão do sistema de pesagem em movimento utilizado para pesagem dos veículos, algumas análises sobre as influências de defeitos na pista de rolamento e uma comparação dos resultados de pesagem em movimento com uma modelagem utilizando o método dos elementos finitos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar a LI real de uma estrutura já existente, possibilitando utilizar o processo inverso e a partir da LI real e dos sinais de deformação de um veículo qualquer, obter o seu Peso Bruto Total (PBT). Obter LI real também permite caracterizar a capacidade de carga da estrutura, entretanto esse assunto não será abordado neste trabalho.

Tais definições auxiliam a determinar qual peso limite será estipulado nas leis de trânsito para a estrutura em questão, de forma a garantir a segurança da mesma, e quais veículos não estão cumprindo essas determinações, cabendo a eles as penalidades previstas

nestas leis.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

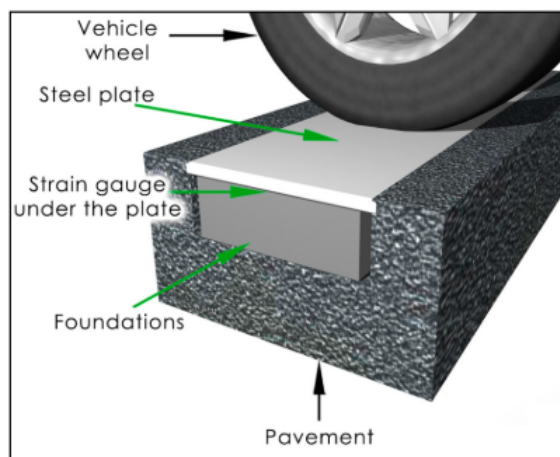
1. Obter a Linha de Influência de uma ponte, a partir de dados de pesagem em movimento, através do algoritmo de Moses;
2. Comparar as linhas de influência real e teórica da estrutura;
3. Validar os resultados experimentais utilizando o Método dos Elementos Finitos;
4. Estudar os efeitos dinâmicos causados por defeitos no tabuleiro.

2 SISTEMAS DE PESAGEM EM MOVIMENTO

O sistema de pesagem em movimento, mais conhecido como *Weigh in Motion* (WIM) em inglês, é definido pela Sociedade Internacional de Pesagem em Movimento (ISWIM) (7) como um processo de medição das forças dinâmicas do pneu de um veículo rodoviário em movimento, da estimativa do peso bruto do veículo e da proporção desse peso transportada por cada eixo de um veículo estático correspondente. Essa estimativa se dá pela instalação de sensores que medem as deformações geradas pela passagem do veículo.

Desenvolvido no Texas na década de 50 por Pr Clyde Lee, originalmente sua proposta era gerar grandes amostras de carregamentos de veículos e eixos para dimensionamento de pavimentos. Entre os primeiros sensores utilizados podemos citar o *Bending Plate*, que utiliza placas com sensores (*strain gauges*) de pressão na face inferior, como ilustrado na Figura 1. A partir do anos 70 novas tecnologias foram desenvolvidas na Europa, como por exemplo os sensores piezoelétricos, capacitivos e de fibra ótica.

Figura 1 – Sensor Bending Plate



Fonte: Burnos (2016)

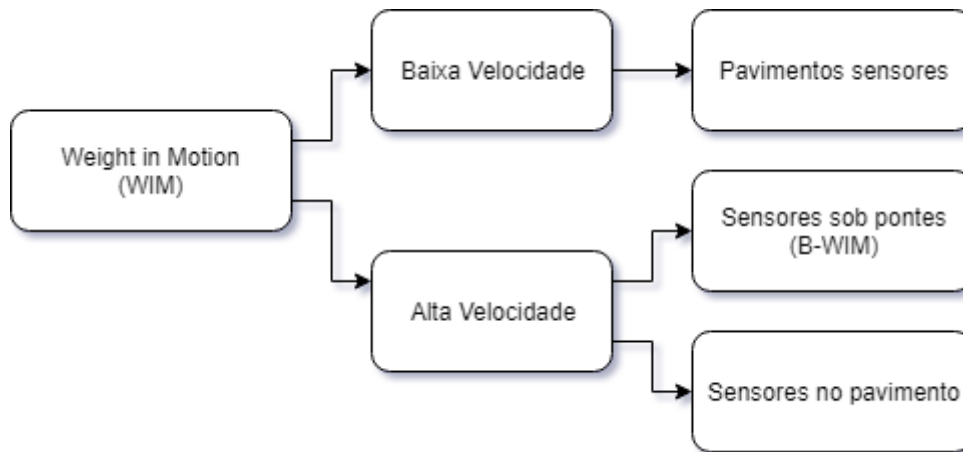
Ao fim dos anos 70 foram introduzidos nos Estados Unidos os sistemas de pesagem em movimento para pontes, chamados de *Bridge Weigh in Motion* (B-WIM). Essa tecnologia foi desenvolvida na Europa nos anos 90. No sistema B-WIM os sensores são instalados na parte inferior do tabuleiro e por este motivo trazem algumas vantagens que serão discutidas ao longo deste trabalho.

Ainda nos anos 90, foi publicada na América do Norte a primeira norma de sistemas WIM, a ASTM-1318. Posteriormente também surgiram especificações europeias, como a COST323, além de diversos testes e pesquisas. O projeto de pesquisa europeu chamado WAVE (*Weighing-in-motion Axles and Vehicles for Europe*) e outras iniciativas, proporcionaram melhorias de tecnologia e novas metodologias do WIM.

No começo dos anos 2000, a exatidão do sistema havia sofrido grandes avanços e era cada vez mais utilizada para triagem e pré seleção de veículos com excesso de carga. Atualmente, busca-se aprimorar a precisão do método de forma a eliminar a necessidade de pesagem em baixa velocidade ou estática, além da possibilidade de determinação da capacidade de carga das estruturas.

O sistema WIM pode ser subdividido entre sistemas de baixa e alta velocidade, como esquematizado na Figura 2. No sistema de baixa velocidade, a pesagem é feita em uma área específica, geralmente fora da linha de tráfego e com velocidades de 5 a 10 km/h, de forma a reduzir os efeitos dinâmicos entre pneu e pavimento. Já no sistema de alta velocidade, a pesagem é feita na própria linha de tráfego, com a velocidade de operação do veículo no trecho, sem necessidade de parada.

Figura 2 – Subdivisões do sistema WIM.



Este trabalho aborda o sistema WIM aplicado em pontes e viadutos, chamado de B-WIM. A instrumentação e os algoritmos relacionados ao B-WIM são apresentados mais adiante, com a aplicação da tecnologia em uma ponte já existente.

3 LINHA DE INFLUÊNCIA

Linha de Influência (LI) é um diagrama que auxilia na obtenção dos esforços máximos de projeto em estruturas sujeitas a carregamentos móveis. Ela representa os esforços em um determinado ponto da estrutura, causados por uma carga unitária que se movimenta por todo o seu comprimento. Para fins de projeto, o ponto escolhido é aquele que apresenta os maiores esforços solicitantes.

Estuda-se a LI de uma estrutura, pois em casos de carregamentos móveis os esforços internos não variam apenas com a magnitude da carga mas também com a posição onde a mesma é aplicada. Geralmente, os esforços máximos são obtidos no meio do vão e por este motivo, a LI que caracteriza esta estrutura é referente à este ponto.

A obtenção da LI de uma ponte através do sistema WIM foi proposta por Moses (10), em 1979, por meio de um algoritmo, chamado Algoritmo de Moses. Este algoritmo é discutido na Seção 3.1.

3.1 ALGORITMO DE MOSES

O algoritmo de Moses utiliza o conceito de LI para obter o peso dos veículos que trafegam sobre pontes compostas por longarinas. Para calcular o peso dos veículos, ele utiliza os dados de deformação dos transdutores, juntamente com as ordenadas da LI da estrutura e a distância entre eixos obtidas através dos sensores detectores de eixos. Esses sensores podem ou não serem visíveis aos motoristas, e quando instalados sob a laje são chamados de FAD (*Free of Axles Detector*).

Esta LI é definida como o conjunto dos momentos fletores na seção onde estão localizados os sensores extensômetros ou *strain gauges*, devido a uma carga unitária que passa pela ponte. Sua obtenção baseia-se no fato de que uma carga móvel gerará tensões proporcionais à soma dos produtos dos pesos dos eixos e suas correspondentes ordenadas da LI.

Logo, o momento fletor solicitante teórico M_{ST} para um veículo de N eixos em uma determinada posição é dado pela Equação 3.1

$$M_{ST} = P_1\ell_1 + P_2\ell_2 + P_3\ell_3 + \dots + P_N\ell_N = \sum_{i=1}^N P_i\ell_i \quad (3.1)$$

onde, N é o número de eixos do veículo;

P_i é o peso de cada eixo;

ℓ_i é o valor da ordenada da linha de influência abaixo do eixo i.

A Figura 3 demonstra os parâmetros necessários para a obtenção do momento solicitante teórico no meio do vão para um veículo de quatro eixos, sobre uma linha de influência teórica.

O momento fletor também pode ser obtido de forma prática a partir dos esforços gerados na viga. Sabe-se que em cada ponto ao longo do comprimento das vigas a tensão relaciona-se com o momento de acordo com a Equação 3.2

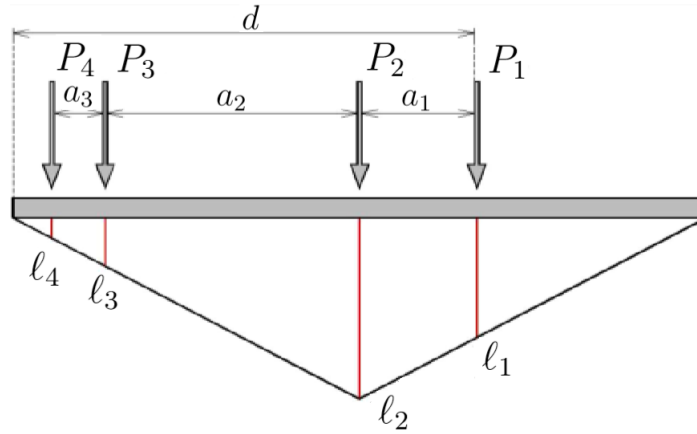
$$\sigma_j = \frac{M_j}{W_j} \quad (3.2)$$

onde, σ_j é a tensão normal na longarina j;

M_j é o momento fletor na longarina j ;

W_j é o módulo elástico da seção transversal da longarina j .

Figura 3 – Obtenção do momento fletor a partir da LI pra um veículo de 4 eixos



Fonte: Adaptado de Junges, Pinto e Miguel (2014)

Para fins de simplificação foram consideradas que todas as longarinas possuem o mesmo módulo elástico da seção transversal W e o mesmo módulo de elasticidade do material E , e portanto, em uma estrutura com n vigas longitudinais, cada uma instrumentada com extensômetros na direção longitudinal, o momento fletor total na seção transversal de estudo pode ser considerado como o somatório dos momentos fletores em todas as vigas. Além disso, sabe-se que a tensão é igual ao produto da deformação específica ε pelo módulo de elasticidade E . Logo, momento solicitante experimental é dado pela Equação 3.3

$$M_{SE} = \sum_{n=1}^n M_n = \sum_{n=1}^n EW_n \varepsilon_n = EW \sum_{n=1}^n \varepsilon_n \quad (3.3)$$

onde, E é o módulo de elasticidade do material;

W_n é o módulo elástico da seção transversal da longarina n ;

ε_n é a deformação específica da longarina n .

Portanto, a soma de todas as deformações específicas das vigas é proporcional ao momento fletor total, relacionados pela constante EW , que pode ser calculada usando a geometria da seção e as propriedades do material.

Em um sistema B-WIM são instalados sensores de deformação de resistência elétrica que realizam as leituras em uma determinada frequência. Isto implica que o número de leituras varia conforme a velocidade do veículo e o comprimento deste, pois as leituras começam assim que o primeiro eixo entra em cima da ponte e termina quando o seu último eixo sai da mesma. Para cada uma dessas leituras, em cada instante k , pode-se calcular um momento fletor. O vetor de momentos fletores totais pode então ser obtido em função do número de leituras, de acordo com a Equação 3.4, apresentada por Quilligan (11)

$$M_{ST} = \sum_{i=1}^N P_i \ell_{(k-C_i)} \quad (3.4)$$

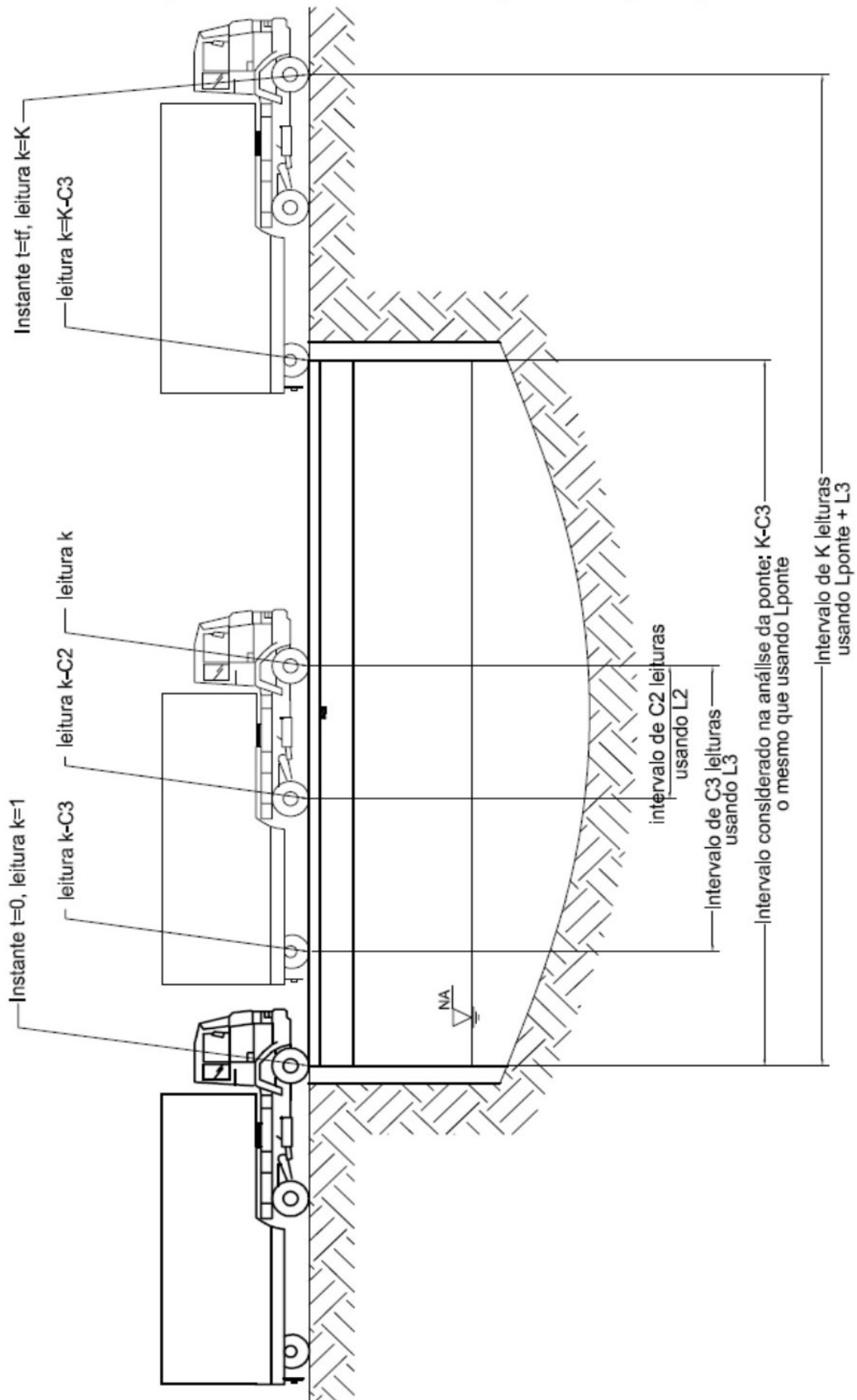
onde, M_{ST} é o momento fletor teórico;

; P_i é o peso de cada eixo;

$\ell_{(k-C_i)}$ é a ordenada da linha de influência para o eixo i na leitura k ;

C_i é o número da leituras correspondente ao eixo distante L_i do primeiro eixo;

Figura 4 – Obtenção das leituras de deformação com a passagem do caminhão.



Fonte: Heinen (2016)

Conhecendo a velocidade, o espaçamento entre os eixos L_i em metros e a frequência de aquisição de dados, é possível definir uma distância entre os eixos C_i definida em função de um número de leituras fixa, como mostra a Equação 3.5

$$C_i = \frac{L_i f}{v} \quad (3.5)$$

onde, L_i é a distância entre o eixo i e o primeiro eixo;

f é a frequência de leituras em Hz;

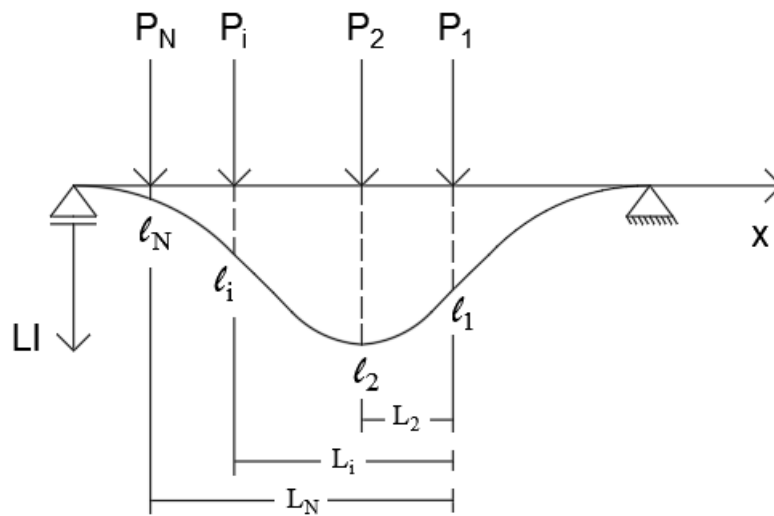
v é a velocidade do veículo em m/s;

As Figuras 4 a 6 explicam melhor este comportamento. Usando como exemplo um caminhão de 3 eixos, como apresentado na Figura 4, pode-se perceber que a deformação começa a ser medida no momento em que o primeiro eixo do veículo entra na ponte. Quando o último eixo chega ao fim da ponte tem-se a última leitura K . A quantidade de leituras depende então, do tamanho do vão da ponte, do comprimento do veículo, da frequência de aquisição do aparelho e da velocidade de passagem do veículo.

A Figura 5 mostra a linha de influência da ponte, numa situação genérica, considerando um caminhão de N eixos cujos pesos de cada eixo são conhecidos ($P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_N$). Num dado instante k após o início da passagem do caminhão sobre a ponte, pode-se obter a ordenada da linha de influência l_k , sob o primeiro eixo do veículo. As ordenadas da linha de influência sob os outros eixos, l_2, l_i, l_N , são nomeadas, $l_{k-C_2}, l_{k-C_i}, l_{k-C_N}$ respectivamente, como mostram as expressões apresentadas em 3.6.

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{K-C_1} & l_2 &= l_{K-C_2} & l_i &= l_{K-C_i} & l_N &= l_{K-C_N} \\ C_1 &= \frac{L_1 f}{v} = 0 & C_2 &= \frac{L_2 f}{v} & C_i &= \frac{L_i f}{v} & C_N &= \frac{L_N f}{v} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Figura 5 – Cargas axiais atuando sobre a ponte, distâncias L_i e ordenadas l_i da LI.



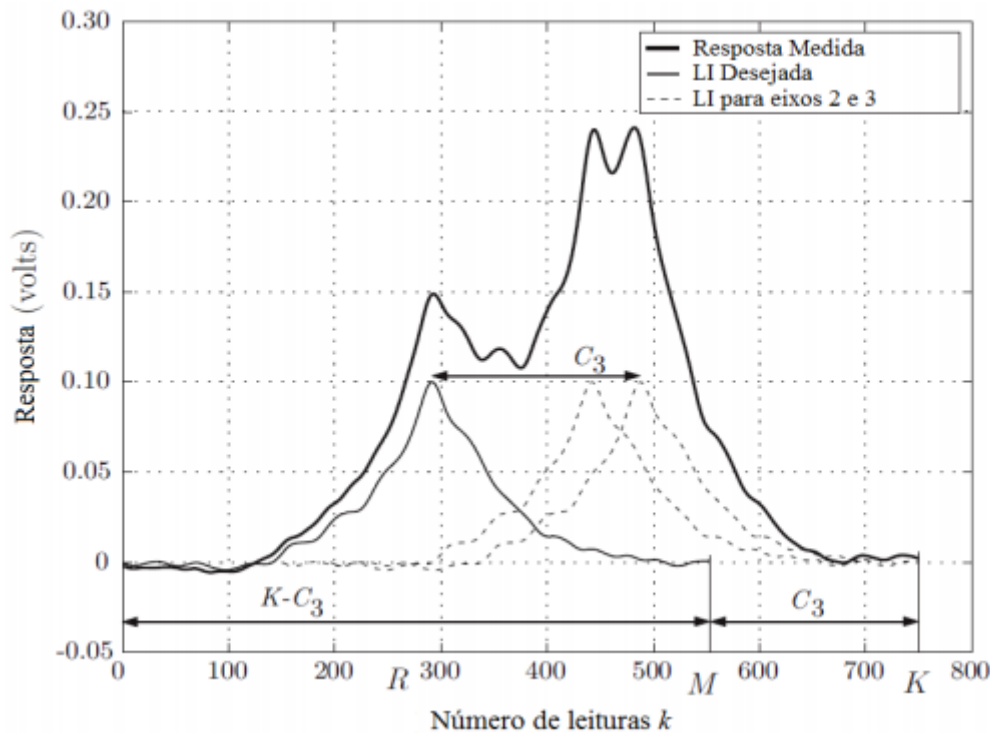
Os sensores de deformação (*strain gauges*) captam um conjunto de K valores de sinais elétricos durante a passagem de um veículo e posteriormente esses sinais são transformados em valores de deformação específica, por meio da multiplicação por uma constante de transformação. O gráfico da Figura 6 exemplifica o sinal proveniente da resposta dos

sensores. Este gráfico representa a passagem de um veículo de 3 eixos, onde no eixo x do gráfico há o número das leituras e no eixo y o valor dessas. Nota-se que nos instantes em que um eixo do caminhão passa sobre o sensor há um pico no sinal obtido. Isto ocorre, pois a leitura da deformação decorrente da passagem de um eixo é tida como máxima quando este eixo passa pelo ponto de instalação do sensor. A existência de 3 picos evidencia a passagem de 3 eixos para este conjunto k de medidas. Também pode-se observar nesta figura a aplicação da nomenclatura adotada, representando os valores de K (todas leituras), C_3 (número de leituras entre o primeiro e o terceiro eixo) e $K-C_3$ (o número de leituras correspondente ao tamanho da ponte).

Os momentos fletores obtidos experimentalmente através do sistema B-WIM, usando as leituras de deformação e as propriedades geométricas e mecânicas da peça, podem ser comparados aos momentos fletores teóricos que são obtidos pelos pesos dos eixos do veículo e da linha de influência da ponte. Espera-se que essa diferença seja bem pequena, indicando que os valores medidos sejam semelhantes aos reais. Moses (10) define assim uma função erro φ igual à soma dos quadrados das diferenças entre o momento fletor solicitante experimental M_{SE} e o momento fletor solicitante teórico M_{ST} como a Equação 3.7, onde K é o numero total de leituras.

$$\varphi = \sum_{k=1}^K (M_k^{SE} - M_k^{ST})^2 \quad (3.7)$$

Figura 6 – Exemplo de sinal elétrico obtido como resposta do extensômetro para caminhão de 3 eixos.



Fonte: Quilligan, 2003

Segundo Heinen (6), é importante ressaltar que o sistema B-WIM descreve o comportamento estático de uma ponte submetida à passagem de uma carga móvel unitária

sobre ela. Porém, a resposta da ponte não é estática, havendo várias interferências tais como as variações de velocidade e rugosidade da pista que incluem efeitos dinâmicos ao sistema. No entanto, dado o grande número de leituras obtidas durante a passagem de um único caminhão e o grande número de eventos de passagens de veículos utilizados para a calibração do sistema, esses componentes dinâmicos são de certa forma amenizados. Estes efeitos estão inclusos na função erro de Moses, apresentada na Equação 3.7.

3.1.1 Linha de Influência Real

Linhas de influência podem ser rapidamente determinadas por análise estrutural. No entanto, ao usá-las no sistema de pesagem em movimento em pontes, os resultados obtidos geralmente não são compatíveis aos medidos no local. Isso se dá, pois a vinculação real da ponte não é perfeitamente biapoitada ou biengastada como considerada nas linhas de influência teóricas usadas para obtenção dos esforços no projeto, sendo geralmente uma situação intermediária entre estas duas situações.

Além de não ser possível determinar visualmente a real situação de vinculação da ponte, em pontes de concreto armado, que é um material heterogêneo, o comportamento ideal considerado nos cálculos não é real, influenciando na resposta da ponte e consequentemente divergindo da LI teórica. Além desses, existem outros fatores que influenciam no desempenho de uma ponte, como por exemplo o processo de execução da estrutura, aspectos ambientais como a interação solo-estrutura, efeitos dinâmicos devido à imperfeições na camada de pavimentação e estado de deterioração. Todos estes fazem com que a LI teórica, ou de projeto, não corresponda a LI real ou experimental.

Dessa forma, utilizar uma linha de influência teórica pode não apresentar resultados suficientemente precisos quando o sistema B-WIM é utilizado na obtenção dos pesos dos eixos que trafegam sobre uma ponte. Torna-se então necessário a determinação da LI real da estrutura. Esta pode ser obtida numericamente a partir de esforços provenientes da passagem de veículos com peso dos eixos conhecidos.

O vetor de ordenadas da linha de influência ℓ , que minimiza o erro φ dado pela Equação 3.7, é o obtido derivando-a parcialmente e igualando-a à zero, com relação à cada ordenada r da linha de influência. Para o caso de um caminhão com 3 eixos, quando todos eles se encontram sobre a ponte, a derivada da função φ em relação à ordenada da linha de influência ℓ_r , pode ser escrita como na Equação 3.9. O índice r varia entre 1 à $K - C_N$, portanto, o número de linhas e colunas é igual ao número de leituras correspondente ao tamanho da ponte.

$$\varphi = \sum_{k=i}^K [M_k^{SE} - (P_1 \ell_{(k)} + P_2 \ell_{(k-c2)} + P_3 \ell_{(k-c3)})]^2 \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \ell_{(r)}} &= 2[M_{(r)}^{SE} - (P_1 \ell_{(r)} + P_2 \ell_{(r-c2)} + P_3 \ell_{(r-c3)})](-P_1) \\ &+ 2[M_{(r+c2)}^{SE} - (P_1 \ell_{(r+c2)} + P_2 \ell_{(r)} + P_3 \ell_{(r+c2-c3)})](-P_2) \\ &+ 2[M_{(r+c3)}^{SE} - (P_1 \ell_{(r+c3)} + P_2 \ell_{(r-c2+c3)} + P_3 \ell_{(r)})](-P_3) = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Rearranjando a Equação 3.9, chega-se à seguinte equação:

$$\begin{aligned} &\ell_{(r-c3)} P_1 P_3 + \ell_{(r-c2)} P_1 P_2 + \ell_{(r+c2-c3)} P_2 P_3 + \ell_{(r)} (P_1^2 + P_2^2 + P_3^2) \\ &+ \ell_{(r-c2+c3)} P_2 P_3 + \ell_{(r+c2)} P_1 P_2 + \ell_{(r+c3)} P_1 P_3 = P_1 M_{(r)}^{SE} + P_2 M_{(r+c2)}^{SE} + P_3 M_{(r+c3)}^{SE} \end{aligned} \quad (3.10)$$

De forma a facilitar o entendimento, a Equação 3.10 pode ser escrita em forma matricial como na Equação 3.11. Esta resolução é chamada por Quilligan et. al (11) e Zhao (13) de Método da Matriz.

$$\mathbf{A} \ell = \mathbf{M} \tag{3.11}$$

Na Equação 3.11, a matriz \mathbf{A} depende dos valores dos pesos dos eixos, ℓ é o vetor que contém as ordenadas das linhas de influência e \mathbf{M} é o vetor que depende dos pesos dos eixos dos veículos e das medidas de deformação lidas.

A Figura 7 exemplifica uma matriz \mathbf{A} para um veículo de 3 eixos. Essa matriz é simétrica e esparsa, facilitando as operações e resultando em um custo computacional menor na resolução da Equação 3.11.

Figura 7 – Matriz \mathbf{A} para um veículo de 3 eixos.

$$[\mathbf{A}]_{K-C_2, K-C_2} =$$

Simétrica

Fonte: Heinen (2016)

A diagonal principal dessa matriz é dada pela soma dos quadrados dos pesos dos eixos dos veículos e corresponde ao valor que acompanha a ordenada da LI $\ell_{(r)}$ na Equação 3.10 como mostra a Equação 3.12.

$$a_{(1,1)} = \sum_{i=1}^N P_i^2 = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 \tag{3.12}$$

O número de diagonais com valores diferentes de 0 (zero) acima ou abaixo da diagonal principal é dado pelo somatório $\sum_{i=1}^{N-1}$, exemplificado para o caso de 3 eixos

na Equação 3.13. O número de diagonais não nulas sobre a diagonal principal somente obedece à essa equação quando o veículo possui comprimento menor que a ponte estudada. Quando o veículo de calibração tem comprimento (distância entre o primeiro e o último eixos) maior que o tabuleiro da ponte o valor $K - C_N$ é menor que C_N e neste caso algumas das diagonais não aparecerão na matriz.

$$\sum_{i=1}^{N-1} = 1 + 2 = 3 \quad (3.13)$$

As diagonais nos triângulos superior e inferior da matriz \mathbf{A} são preenchidas por combinações de cargas axiais, produtos entre pares de cargas como P_1P_2 , P_1P_3 , P_2P_3 , que aparecem a distâncias da diagonal principal proporcionais às distâncias entre seus eixos ($C_2 - C_1$, $C_3 - C_1$ e $C_3 - C_2$).

Para um caminhão de 3 eixos, os valores para a primeira linha da matriz \mathbf{A} são:

$$\begin{aligned} a_{(1,1+(c3-c2))} &= P_3P_2 \\ a_{(1,1+c2)} &= P_3P_2 \\ a_{(1,1+c3)} &= P_3P_2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

O mesmo processo é aplicado em caminhões com n eixos. A sequência de equações seguintes exemplifica a aplicação da formulação apresentada anteriormente em um caminhão de 5 eixos.

Desta forma, temos a função erro φ dada pela Equação 3.15.

$$\varphi = \sum_{k=i}^K [M_k^{SE} - (P_1\ell_{(k)} + P_2\ell_{(k-C_2)} + P_3\ell_{(k-C_3)} + P_4\ell_{(k-C_4)} + P_5\ell_{(k-C_5)})]^2 \quad (3.15)$$

Derivando-a parcialmente e igualando à zero tem-se uma equação similar à apresentada para um veículo de 3 eixos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \ell_{(r)}} &= 2[M_{(r)}^{SE} - (P_1\ell_{(r)} + P_2\ell_{(r-C_2)} + P_3\ell_{(r-C_3)} + P_4\ell_{(r-C_4)} + P_5\ell_{(r-C_5)})](-P_1) \\ &+ 2[M_{(r+C_2)}^{SE} - (P_1\ell_{(r+C_2)} + P_2\ell_{(r)} + P_3\ell_{(r+C_2-C_3)} + P_4\ell_{(r+C_2-C_4)} + P_5\ell_{(r+C_2-C_5)})](-P_2) \\ &+ 2[M_{(r+C_3)}^{SE} - (P_1\ell_{(r+C_3)} + P_2\ell_{(r+C_3-C_2)} + P_3\ell_{(r)} + P_4\ell_{(r+C_3-C_4)} + P_5\ell_{(r+C_3-C_5)})](-P_3) \\ &+ 2[M_{(r+C_4)}^{SE} - (P_1\ell_{(r+C_4)} + P_2\ell_{(r+C_4-C_2)} + P_3\ell_{(r+C_4-C_3)} + P_4\ell_{(r)} + P_5\ell_{(r+C_4-C_5)})](-P_4) \\ &+ 2[M_{(r+C_5)}^{SE} - (P_1\ell_{(r+C_5)} + P_2\ell_{(r+C_5-C_2)} + P_3\ell_{(r+C_5-C_3)} + P_4\ell_{(r+C_5-C_4)} + P_5\ell_{(r)})](-P_5) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Novamente, para melhor visualização, a equação acima será rearranjada e separada entre lado esquerdo e direito da igualdade. O lado esquerdo da equação é dado pela fração de equação 3.17.

$$\begin{aligned} &(P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2 + P_5^2)\ell_{(r)} \\ &+ P_1P_2\ell_{(r-C_2)} + P_1P_3\ell_{(r-C_3)} + P_1P_4\ell_{(r-C_4)} + P_1P_5\ell_{(r-C_5)} \\ &+ P_2P_1\ell_{(r+C_2)} + P_2P_3\ell_{(r+C_2-C_3)} + P_2P_4\ell_{(r+C_2-C_4)} + P_2P_5\ell_{(r+C_2-C_5)} \\ &+ P_3P_1\ell_{(r+C_3)} + P_3P_2\ell_{(r-C_2+C_3)} + P_3P_4\ell_{(r+C_3-C_4)} + P_3P_5\ell_{(r+C_3-C_5)} \\ &+ P_4P_1\ell_{(r+C_4)} + P_4P_2\ell_{(r-C_2+C_4)} + P_4P_3\ell_{(r+C_3-C_4)} + P_4P_5\ell_{(r+C_4-C_5)} \\ &+ P_5P_1\ell_{(r+C_5)} + P_5P_2\ell_{(r-C_2+C_5)} + P_5P_3\ell_{(r-C_3+C_5)} + P_5P_4\ell_{(r-C_4+C_5)} \end{aligned} \quad (3.17)$$

No lado direito da equação tem-se:

$$P_1 M_{(r)}^{SE} + P_2 M_{(r+C_2)}^{SE} + P_3 M_{(r+C_3)}^{SE} + P_4 M_{(r+C_4)}^{SE} + P_5 M_{(r+C_5)}^{SE} \quad (3.18)$$

Os valores da diagonal principal da matriz \mathbf{A} tem os seguintes valores:

$$P_{k,k} = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2 + P_5^2 \quad (3.19)$$

E o número de diagonais não nulas acima ou abaixo da diagonal principal é:

$$\sum_{i=1}^{N-1} = 1 + 2 + 3 + 4 = 10 \quad (3.20)$$

As diagonais não nulas são compostas pelos valores abaixo:

$$\begin{aligned} a_{k,k+C_2} &= P_1 P_2 \\ a_{k,k+C_3} &= P_1 P_3 \\ a_{k,k+C_4} &= P_1 P_4 \\ a_{k,k+C_5} &= P_1 P_5 \\ a_{k,k+(C_3-C_2)} &= P_2 P_3 \\ a_{k,k+(C_4-C_2)} &= P_2 P_4 \\ a_{k,k+(C_5-C_2)} &= P_2 P_5 \\ a_{k,k+(C_4-C_3)} &= P_3 P_4 \\ a_{k,k+(C_5-C_3)} &= P_3 P_5 \\ a_{k,k+(C_5-C_4)} &= P_4 P_5 \end{aligned}$$

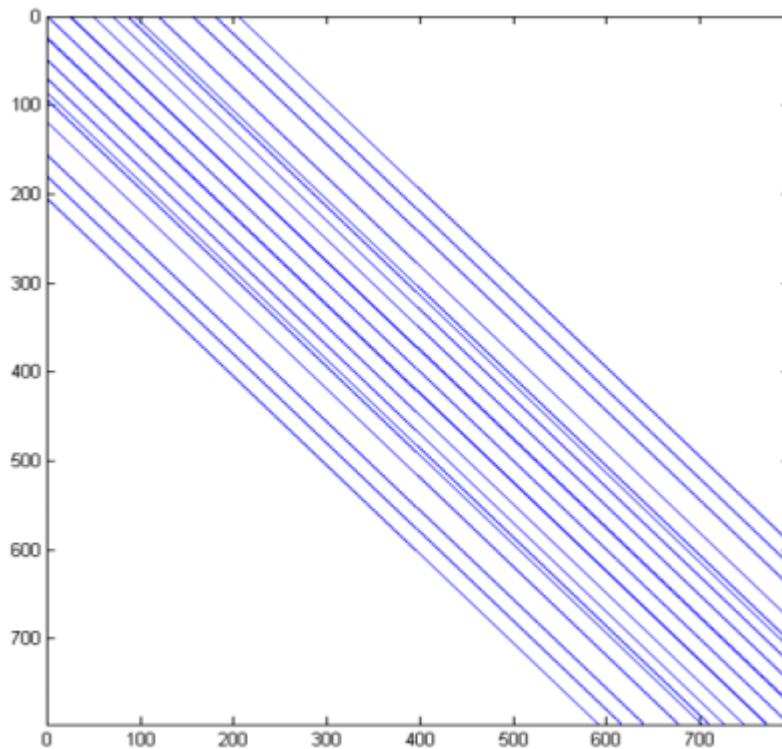
É importante ressaltar que veículos que possuem distâncias iguais entre eixos podem apresentar valores ocupando a mesma posição da matriz \mathbf{A} e por isso, devem ser somados.

A matriz \mathbf{A} para um veículo de 5 eixos é representada graficamente na Figura 8. As diagonais representam os valores diferentes de zero, ou seja, as diagonais não nulas.

O vetor \mathbf{m} depende das cargas dos eixos e das leituras de deformação. O valor M_k^{SE} , momento fletor medido em cada leitura, é obtido multiplicando o valor da deformação em cada instante pela constante EW. Este vetor é definido como o mostrado na equação 3.21 e tem ordem $K - C_N$, que é número de leituras correspondente ao tamanho da ponte.

$$\mathbf{m} = \left\{ \begin{array}{l} P_1 M_1^{SE} + P_2 M_{1+C_2}^{SE} + \dots + P_N M_{1+C_N}^{SE} \\ P_1 M_2^{SE} + P_2 M_{2+C_2}^{SE} + \dots + P_N M_{2+C_N}^{SE} \\ P_1 M_3^{SE} + P_2 M_{3+C_2}^{SE} + \dots + P_N M_{3+C_N}^{SE} \\ \vdots \\ P_1 M_{(K-C_N)}^{SE} + P_2 M_{(K-C_N-C_2)}^{SE} + \dots + P_N M_K^{SE} \end{array} \right\} \quad (3.21)$$

Figura 8 – Matriz A para veículo de 5 eixos.



Fonte: Heinen (2016)

O vetor ℓ contém as ordenadas da LI real em cada instante, cujos valores começam no ponto em que foi obtida a primeira leitura até $K-C_N$, que é o tamanho da ponte. Para resolver esta equação, deve-se isolar ℓ da Equação 3.11, invertendo-se a matriz \mathbf{A} .

$$\ell = A^{-1}m \quad (3.22)$$

Após feita a calibração com veículos conhecidos para determinar a linha de influência real, ao utilizar o sistema B-WIM para análises de pesagem em movimento passa-se a fazer o processo contrário ao apresentado anteriormente. A deformação específica é medida e transformada em momento fletor, e o carregamento que causa este momento fletor é calculado, obtendo assim os pesos dos eixos dos veículos que trafegam sobre a estrutura.

3.1.2 Velocidade e espaçamento entre eixos

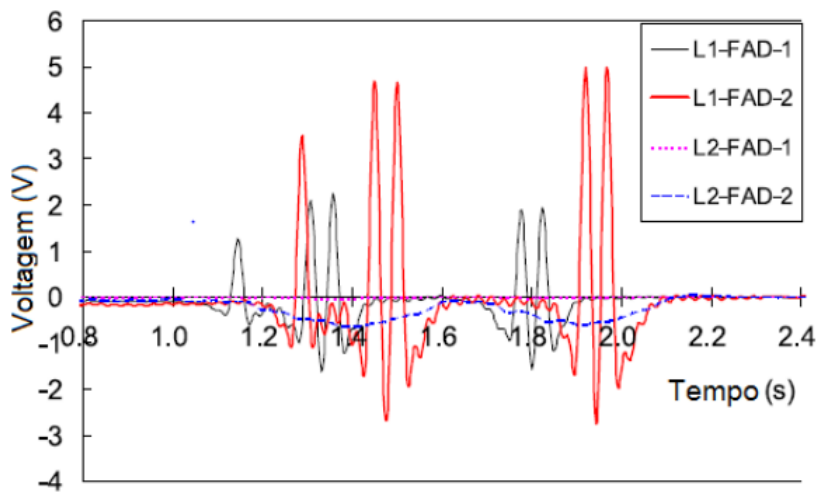
A obtenção da velocidade e do espaçamento entre eixos pode ser determinada utilizando o sistema NOR BWIM, *Nothing On the Road Bridge Weigh-In-Motion*, que caracteriza-se pelo uso de sensores sob a laje, alinhados longitudinalmente ao fluxo dos veículos a uma distância menor do que a menor distância entre eixos dos veículos a serem classificados. Assim não é necessário utilizar detectores de eixos sobre a pista que ficam aparentes aos motoristas, pois os mesmos acabam reduzindo a velocidade ao visualizar as instalações do sistema. Por esse motivo o sistema é também chamado de Free of Axles Detector (FAD).

Assim, como os sensores *strain gauges*, por serem colocados sob a laje, os sinais obtidos por sensores FAD apresentam picos quando um eixo passa sobre a posição do sensor. O número de picos representa então o número de eixos passantes sobre a laje

da ponte, na posição do sensor. A distância entre os eixos também pode ser obtida com sensores FAD, já que são instalados dois sensores longitudinais à pista, onde o número de leituras entre os picos representa a distância entre eixos.

A Figura 9 mostra um exemplo dos sinais obtidos pelos dois sensores FAD dispostos longitudinalmente em uma estrutura de pista simples e dois sentidos de tráfego. O veículo de 5 eixos passa primeiro pelo sensor FAD1 e depois pelo sensor FAD2 no sentido de tráfego L1, sendo que o sinal do segundo sensor é maior que do primeiro por estar localizado mais ao centro do vão, resultando em deformações maiores. Na figura nota-se a presença de 5 picos bem pronunciados representando cada um dos 5 eixos e apresenta sinais de maior magnitude no sentido L1, indicando que o veículo trafegou pela pista onde esses sensores estão instalados.

Figura 9 – Sinais de sensores FAD.



Fonte: Heinen (2016)

Os picos do FAD1 serão nomeados como t_i , e no FAD2 de t'_i . A velocidade pode ser obtida a partir das diferenças entre os tempos dos picos e da distância entre os dois sensores instalados L_{FAD} , onde i é o número de picos ou eixos.

$$v = \frac{L_{FAD}}{t'_i - t_i} \quad (3.23)$$

A Equação 3.23 pode resultar em velocidades diferentes para cada eixo, devido à dificuldade de manter a velocidade constante durante a passagem do veículo. No entanto, essas variações são pequenas e a velocidade pode ser considerada constante.

O espaçamento entre um eixo i e o eixo seguinte $i+1$ é dado pela Equação 3.24, onde i é o número de eixos ou picos. Este valor pode ser utilizado como a distância L_i na Equação 3.5.

$$s_{i,i+1} = v(t_{i+1} - t_i) \quad (3.24)$$

3.1.3 Peso dos eixos e peso bruto total

Tendo a linha de influência real da ponte é possível calcular os pesos dos eixos de qualquer veículo que trafegue sobre a estrutura. Para isto, serão utilizadas as mesmas equações apresentadas anteriormente como, por exemplo, o vetor M_k^{ST} da Equação 3.4

que pode ser reescrito como

$$M_k^{ST} = EW\varepsilon_k^t = P_1\ell_{(k)} + P_2\ell_{(k-C_2)} + \dots + P_N\ell_{(k-C_N)} \quad (3.25)$$

onde, ε_k^t é a deformação específica teórica para o instante k .

A equação 3.25 pode ser escrita na forma matricial como mostrado na Equação 3.26, onde ε é o vetor com as medidas de deformação da ponte durante toda a passagem do veículo, apresentando K valores. \mathbf{P} é o vetor com os pesos dos eixos do veículo, e possui N elementos. \mathbf{L} é uma matriz com as ordenadas da LI embaixo de cada eixo no instante em questão. Esta matriz tem N colunas, correspondentes ao número de eixos do veículo, e número de linhas igual ao total de leituras de deformação k .

$$EW \cdot \varepsilon = L \cdot P \quad (3.26)$$

Quando apenas o primeiro eixo está sobre a ponte os valores das linhas $k = 1$ até $k = C_2 - 1$ nas colunas referentes aos demais eixos serão iguais à zero, pois não há linha de influência sob esses eixos uma vez que os mesmos ainda não adentraram na ponte. A medida que os demais eixos adentram na estrutura, estas colunas vão sendo preenchidas. A partir da entrada do segundo eixo na ponte $k = C_2$, já existem ordenadas na linha de influência referentes a este mesmo eixo, enquanto os demais eixos que ainda não adentraram na ponte continuam zerados. De mesma forma, assim que o primeiro eixo sair da ponte, não haverá mais ordenadas da linha de influência referentes a este eixo, portanto esses valores a partir de $k = K - C_N$ na primeira coluna serão iguais à zero. Esse comportamento é o mesmo para todos os eixos. A Equação 3.26 pode ser reescrita como a Equação 3.27.

$$EW \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_1^1 & \ell_1^2 & \dots & \ell_1^N \\ \ell_2^1 & \ell_2^2 & \dots & \ell_2^N \\ \ell_3^1 & \ell_3^2 & \dots & \ell_3^N \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \ell_K^1 & \ell_K^2 & \dots & \ell_K^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_N \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

Para encontrar os valores P_i dos pesos dos eixos deve-se minimizar a função erro apresentada na Equação 3.7. Zhao (14) apresenta a sequência de cálculos para encontrar os pesos, partindo da função erro entre os sinais de deformação teóricos e medidos, que pode ser escrita na forma matricial como nas Equações 3.28. A Equação 3.29 é a mesma Equação 3.28 representada de forma distributiva.

$$\varphi = (\varepsilon^m - \varepsilon^t)^T \cdot (\varepsilon^m - \varepsilon^t) \quad (3.28)$$

$$\varphi = (\varepsilon^{mT} \cdot \varepsilon^m) - (\varepsilon^{mT} \cdot IL \cdot P) - (P^T \cdot IL^T \cdot \varepsilon^m) + (P^T \cdot IL^T \cdot IL \cdot P) \quad (3.29)$$

Minimizando a função erro em relação aos pesos dos eixos chega-se a Equação 3.31.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial P} = 0 - (\varepsilon^{mT} \cdot IL) - (IL^T \cdot \varepsilon^m) + (2 \cdot IL^T \cdot IL \cdot P) = 0 \quad (3.30)$$

$$P = (IL^T \cdot IL)^{-1} \cdot IL^T \cdot \varepsilon^m \quad (3.31)$$

O Peso Bruto Total (PBT) é resultado do somatório dos pesos dos eixos, conforme a Equação 3.32.

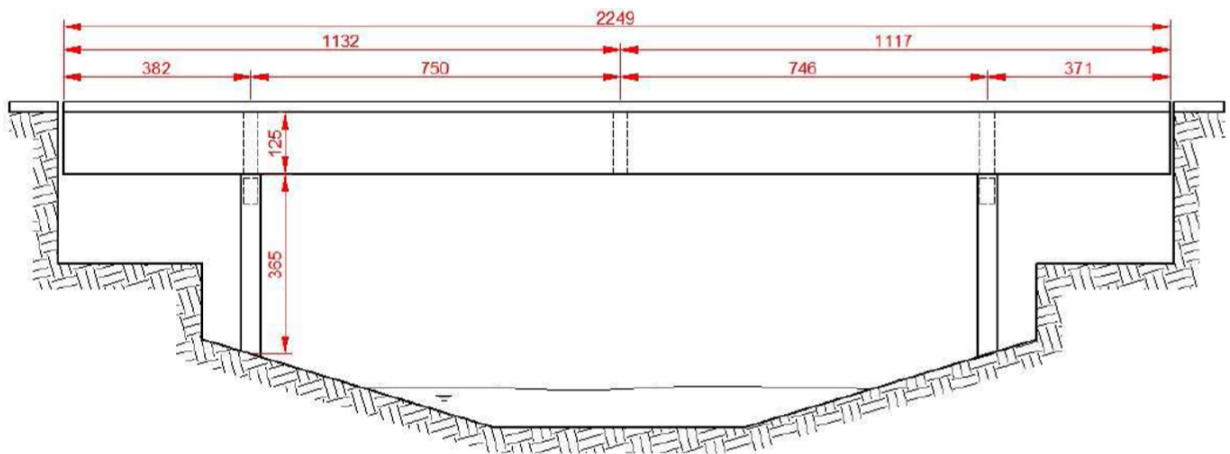
$$PBT = \sum_{i=1}^N P_i \quad (3.32)$$

4 ESTUDO DE CASO: PONTE SOBRE O RIO LAMBARI

A ponte estudada está localizada na rodovia BR-153, km 135, entre os estados de Goiás e Tocantins. Esta rodovia é a quarta maior do Brasil e por ligar a região norte do país à região centro sul, caracteriza um dos mais importantes corredores de escoamento de cargas do de todo o território brasileiro. Por este motivo, existe nesta região um grande tráfego de veículos, com um volume médio diário em torno de 9000 veículos dos quais 3500 são veículos pesados (3).

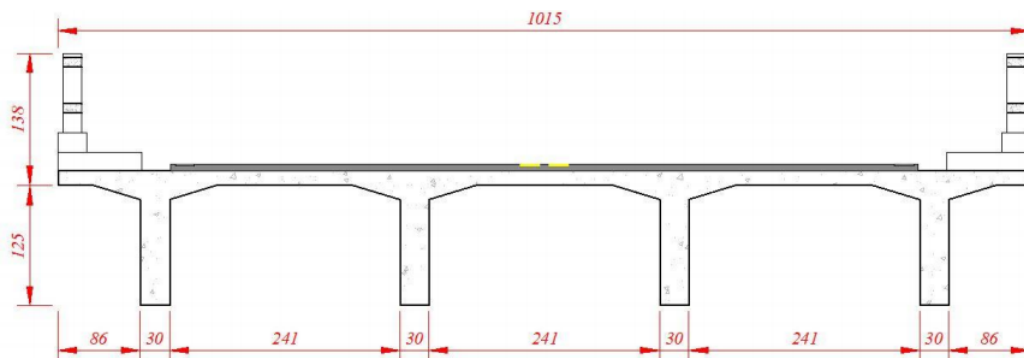
A estrutura em questão apresenta características adequadas ao sistema B-WIM, fácil acesso para instalação do sistema e inspeção, e patologias como deterioração do concreto e corrosão de armaduras, que distanciam ainda mais as condições reais das de projeto. Através de um ensaio de esclerometria realizado por Giovannetti (4)(5), percebeu-se grande variação dos valores do índice esclerométrico para as longarinas, indicando ainda uma má uniformidade do concreto.

Figura 10 – Vista lateral da ponte sobre o rio Lambari



Fonte: LabTrans/UFSC (2016)

Figura 11 – Seção transversal da superestrutura da ponte sobre o rio Lambari

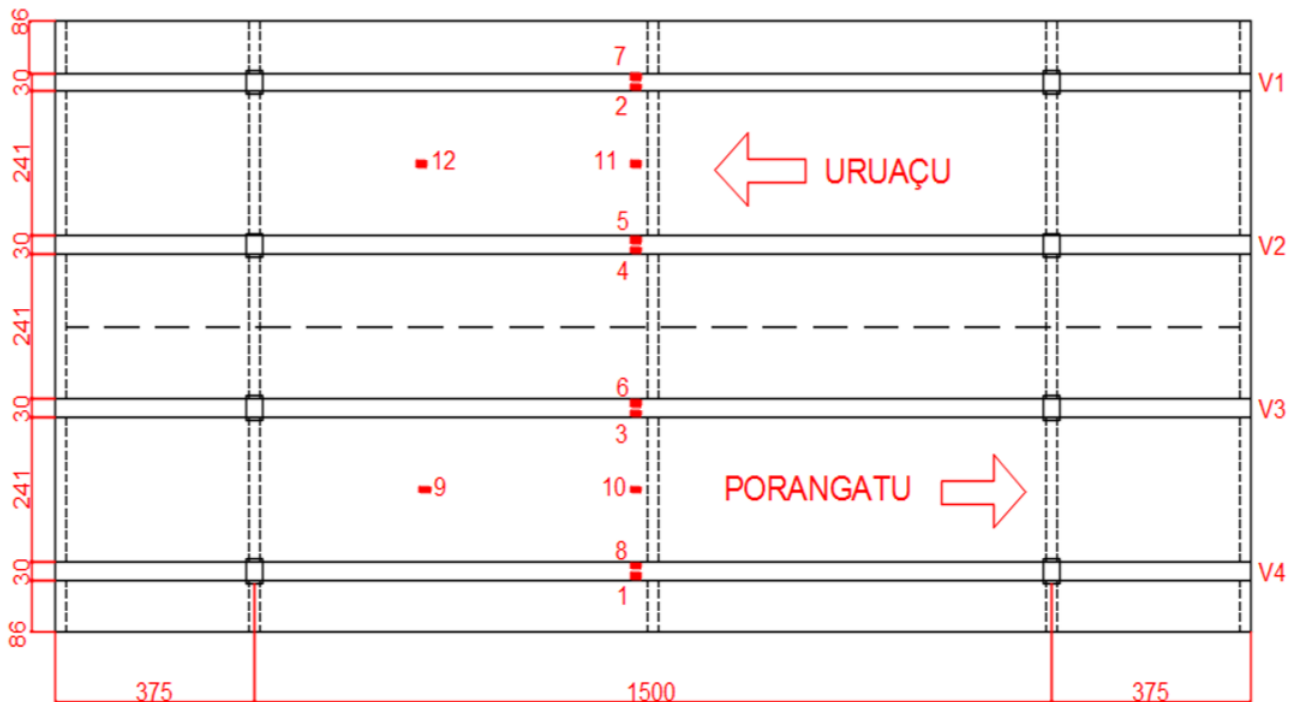


Fonte: LabTrans/UFSC (2016)

A ponte Lambari é uma estrutura de concreto armado composta por quatro lon-

garinas que se apoiam em pilares distantes de 14,96 metros, além das extremidades em balanço que medem 3,71 e 3,82 metros cada, de acordo com as Figuras 10 e 11. Sua seção transversal também conta com cinco transversinas localizadas nas extremidades, acima dos pilares e no centro de seu vão livre. Estas poderão ser observadas na Figura 12, ilustradas com linha tracejada.

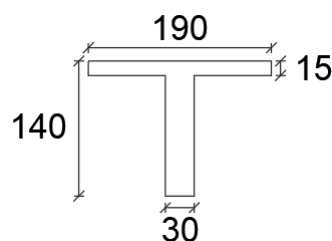
Figura 12 – Localização das transversinas e sensores.



Fonte: Heinen (2016)

Por se tratar de uma estrutura antiga, não foi possível localizar o seu projeto original e por este motivo todos os cálculos referentes ao dimensionamento foram refeitos por Heinen (6), seguindo a norma NB1 (1960) vigente na época de construção da mesma. Chegou-se à uma seção transversal de viga T conforme o ilustrado na Figura 13, onde seu módulo de elasticidade E vale 18435000 kN/m^2 e módulo de rigidez W é igual a $0,2723 \text{ m}^3$. Para isto, foi considerado que a largura efetiva da seção das longarinas mede 190 cm, com laje de 15 cm de espessura e concreto com resistência de 15 MPa.

Figura 13 – Seção transversal das longarinas.



Através de inspeções realizadas por Giovannetti (5), foi constatado um desnível na via de aproximadamente 3 cm em uma das cabeceiras da ponte, como mostra a Figura 14. Mais adiante será mostrado a influência desse tipo de defeito na segurança da estrutura.

Figura 14 – Desnível na cabeceira da ponte.



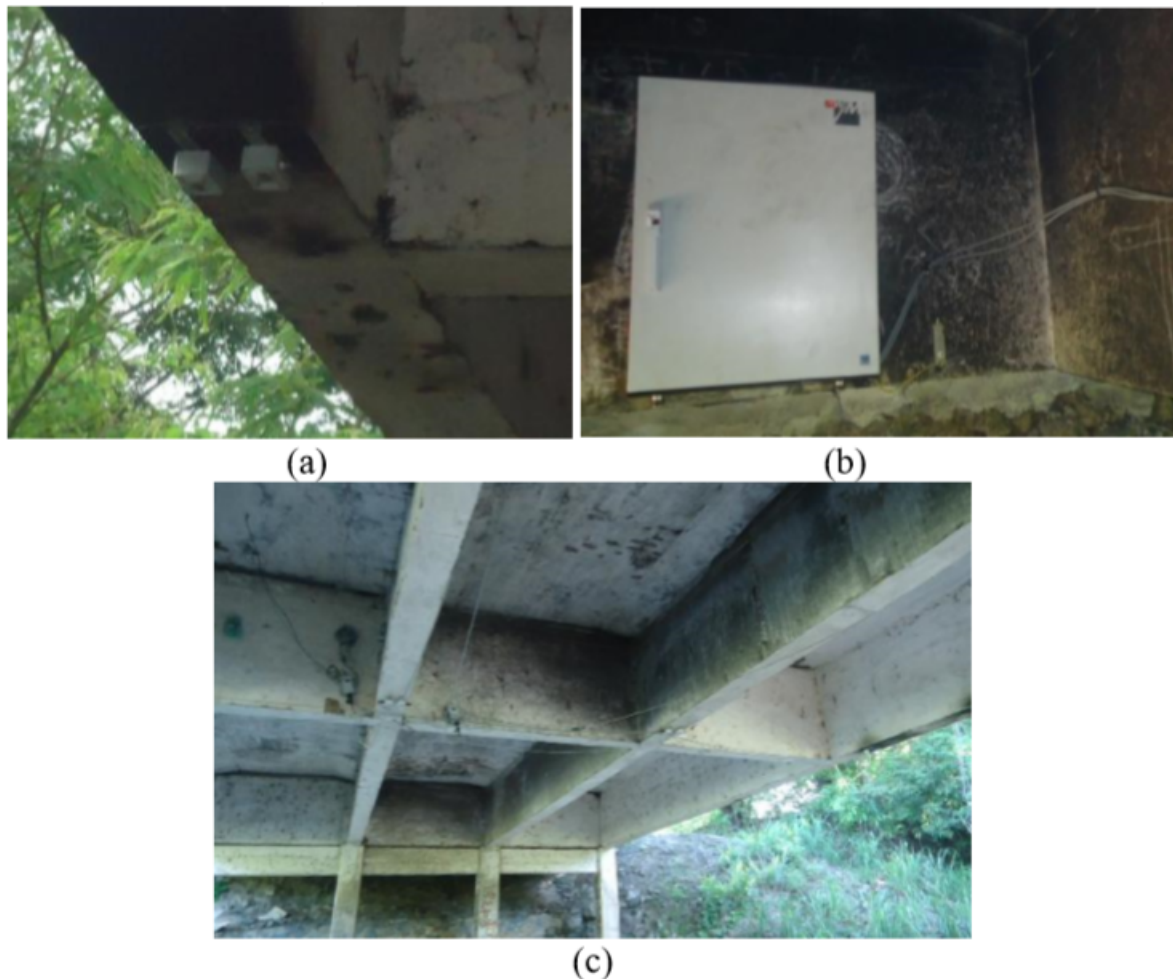
Fonte: Giovannetti (2014)

4.1 INSTRUMENTAÇÃO

O sistema B-WIM utiliza sensores de deformação ou *strain gauges* para medir as deformações geradas nas pontes, nos pontos de instalação dos transdutores, quando uma carga qualquer trafega sobre ela. Na ponte Lambari, este sistema configura-se por um conjunto de 12 sensores transdutores, onde 8 deles são utilizados para a pesagem em movimento e os outros 4 detectam a distância entre eixos e a velocidade dos veículos. Estes sensores foram posicionados e numerados de acordo com a Figura 12.

Como é possível notar, cada longarina possui 2 sensores, um de cada lado, posicionados o mais próximo do centro do vão da ponte. Desta maneira, são medidos os deslocamentos máximos possíveis ao longo de toda a estrutura, que geralmente ocorre no centro da mesma, para cada longarina. Não foi possível instalar os sensores exatamente no centro do vão devido a presença de uma transversina nesse local.

Figura 15 – Instalação do sistema B-WIM.



Fonte: LabTrans/UFSC (2016)

4.2 TRATAMENTO DOS DADOS E CALIBRAÇÃO

O processo de calibração do sistema B-WIM consiste na obtenção de uma LI real e seguiu as recomendações do relatório COST 323 (2), utilizando veículos de peso e dimensões conhecidas, que passam sobre a estrutura inúmeras vezes. Esses veículos devem pertencer a pelo menos duas clases (rígido e articulado), em mais de um nível de velocidade. Quanto maior o número de passagens, maior a precisão do sistema. Para este projeto de pesquisa foram utilizados dois tipos de veículos, um veículo rígido de 3 eixos e um veículo articulado de 5 eixos, cujas características relevantes se encontram na Tabela 1. Os pesos dos eixos foram obtidos através da pesagem estática.

Tabela 1 – Características dos veículos de calibração

Tipo	Peso por eixo [kN]					PBT	Distância eixos [m]			
	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅		e ₁ -e ₂	e ₂ -e ₃	e ₃ -e ₄	e ₄ -e ₅
3 eixos	46,7e3	108,6e3	108,6e3	-	-	264,0e3	4,60	1,29	-	-
5 eixos	51,8e3	53,5e3	87,6e3	87,6e3	87,6e3	368,0e3	4,27	3,47	1,23	1,23

As passagens de calibração ocorreram em novembro de 2013, e neste trabalho serão denominadas eventos. O banco de dados conta com um total de 61 eventos que abrangem

passagens em ambos os sentidos, com veículos de 3 e 5 eixos e níveis de velocidade constantes em cada um. Cada evento possui um número de leituras qualquer, que depende do início e do término do registro dos sinais durante a passagem dos veículos e representa a passagem de um único veículo de calibração.

Para a determinação da LI real esses eventos passaram por um processo de seleção de dados, que será descrito nas seções seguintes. Todos os eventos foram numerados em ordem cronológica e classificados. A fim de garantir a eficácia dos métodos adotados para a seleção dos dados, todos os critérios apresentados abaixo foram analisados para cada um dos eventos minuciosamente. Os resultados obtidos nesta etapa estão contidos em uma tabela e podem ser consultados no Apêndice A. Esse processo foi incorporado ao algoritmo de Moses para desconsiderar eventos que não apresentavam uma LI condizente com uma LI representativa da estrutura, resultando em um total de 27 eventos.

4.2.1 Sentido de tráfego

A ponte analisada é composta por uma via simples de sentido duplo onde na entrada de uma dessas vias, no sentido Porangatu, há um defeito na pista que resulta em sinais de deformação mal definidos, resultando em linhas de influência que não representam a LI real da ponte. Isso ocorre pois o defeito contido na pista faz com que o veículo entre na estrutura causando maior impacto e resultando em maiores deformações.

Por este motivo os eventos referentes ao sentido Porangatu foram desconsiderados na obtenção da LI real da ponte, mas serão utilizados posteriormente na análise do efeito de defeitos na camada de pavimentação.

Para detectar o sentido do veículo de forma automatizada em cada evento, foi verificado qual dos sensores detectores de eixo possuem o maior pico de deformações, visto que as deformações geradas nas longarinas são maiores no próprio sentido de passagem. Ou seja, os eventos onde os sensores referentes ao sentido Porangatu possuíam os maiores picos foram desconsiderados para a obtenção da LI real.

4.2.2 Número de eixos

A calibração do sistema de pesagem da ponte foi realizada a partir de dois veículos tipo de 3 e 5 eixos. Foram então identificados os eventos onde houve a passagem de veículos diferentes do estabelecido e também situações com múltiplas passagens em um mesmo evento.

Para isso utilizou-se foram verificados o número de picos dos sensores detectores de eixos e seus respectivos instantes. Este número foi comparado ao número de eixos dos veículos de calibração e desconsiderados os eventos que apresentavam este número diferente de 3 e 5.

4.2.3 Peso bruto total

Uma das características interessantes dos eventos válidos é a sua capacidade de recuperar o seu peso a partir da LI gerada pelo próprio evento. Os pesos obtidos tiveram resultados muito próximos do peso real, adotando um limite de erro percentual de 0,1%. O cálculo do erro percentual foi obtido de acordo com a Equação 4.1, onde o PBT do caminhão tipo de 3 eixos vale $2,6399e+05$ e do de 5 eixos vale $3,6799e+05$.

$$E\%PBT = \left| \frac{PBT - PBT_{medido}}{PBT} \right| \cdot 100 \quad (4.1)$$

No geral, todas as linhas de influência que possuíam alguma irregularidade foram filtradas nesta etapa.

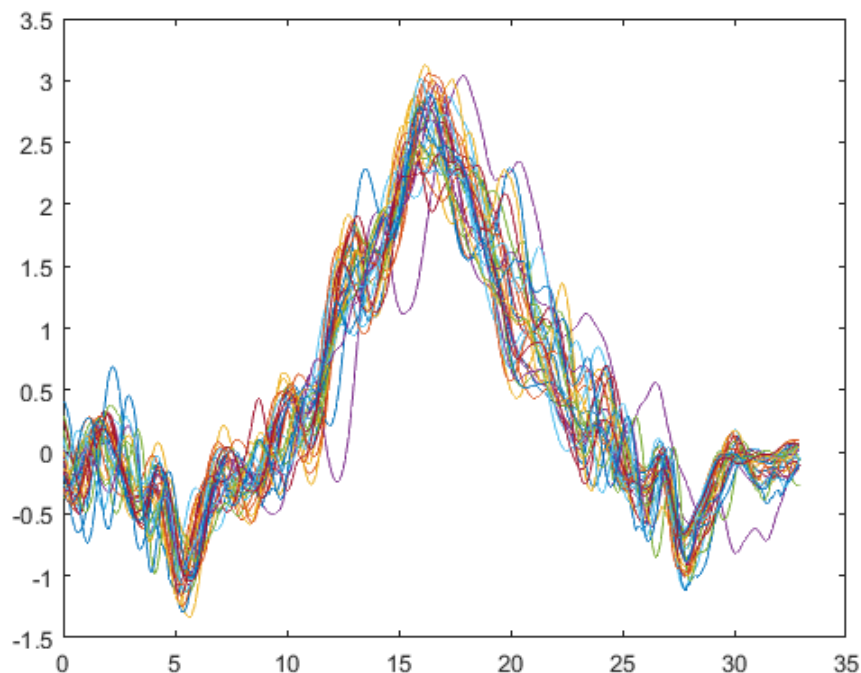
4.2.4 Desvio da média

Por fim, para eliminar os eventos que passaram em todos os filtros anteriores mas que ainda possuíam alguma irregularidade, foi realizada uma verificação do desvio da ordem de grandeza das linhas de influência de todos os eventos válidos até então, excluindo aqueles que possuíam um desvio da média maior que 0,5. Para isto foram analisados os picos das linhas de influência geradas pelos dados do próprio evento.

4.3 LINHA DE INFLUÊNCIA REAL

A Linha de Influência Real da ponte sobre o Rio Lambari foi então obtida a partir do Algoritmo de Moses, apresentado na seção 3.1. Foram geradas linhas de influência para cada um dos eventos que passaram na etapa de validação dos dados, ou seja, todos os eventos que apresentaram um LI condizente com a realidade.

Figura 16 – Linha de Influência por evento da Ponte Lambari

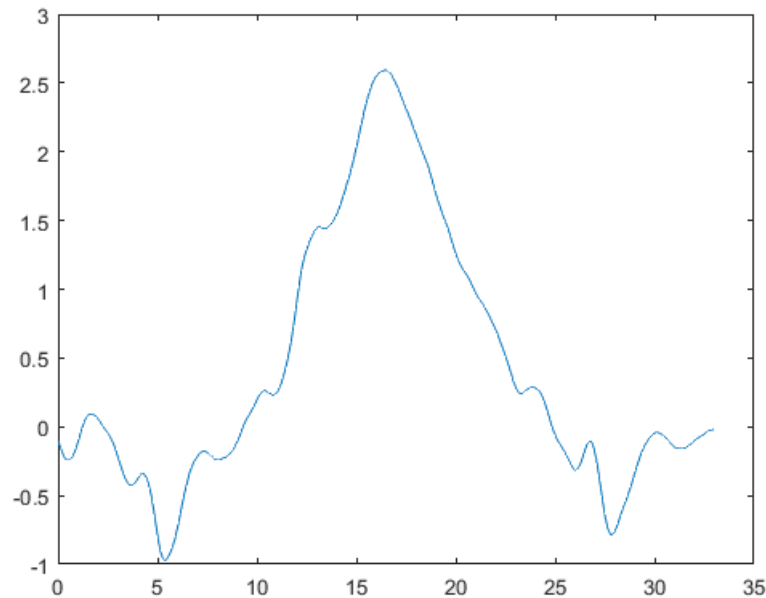


Obtidas as linhas de influência de cada um dos 27 eventos, foi realizada uma média entre todas estas para definir uma LI real correspondente à estrutura analisada. A LI obtida está representada pela Figura 17. É válido ressaltar que a mesma considera o efeito dinâmico causado pela interação veículo-estrutura, e por este motivo, a LI apresenta mais de um pico.

Para extrair o efeito dinâmico da estrutura, deve-se aplicar um filtro que separa este efeito da LI utilizando a frequência natural da ponte. Um exemplo é a utilização de filtros passa baixa, que eliminam a resposta com frequências superiores a um determinado nível.

A partir da LI filtrada é possível obter os pesos dos eixos de qualquer veículo que trafegue sobre a ponte, utilizando a formulação apresentada na Seção 3.1.3. Os resultados obtidos apresentam erros % pequenos, da ordem de 0,5 à 3%, segundo as pesquisas de Junges et al. (8) quando se é utilizado um filtro do tipo passa baixa. Portanto, para as

Figura 17 – Linha de Influência real da Ponte Lambari



próximas análises foi implementada a filtragem dos eventos utilizando uma frequência de corte de 2Hz. A frequência natural da ponte não foi calculada, sendo 2Hz escolhido pois apresentava a melhor redução do efeito dinâmico, restando apenas um pico na LI filtrada. Na Figura 18 estão representados os sinais referentes ao evento 1, da longarina de número 4 e uma frequência de corte de 2Hz. Deste modo, todos os dados dos eventos foram filtrados e foi então gerada uma nova linha de influência média para os eventos válidos. Esta LI está representada na Figura 19 juntamente com a LI não filtrada e apresenta um traçado mais regular devido à ausência da parcela do efeito dinâmico. Nota-se também a redução do pico da ordenada com a filtragem da parcela dinâmica, que passou de 2,63 para 2,19, mostrando que a parcela dinâmica é significativa no processo de dimensionamento desse tipo de estrutura, normalmente considerada através de um coeficiente de amplificação dinâmica. Anteriormente foi mencionada a complexidade de caracterizar os vínculos de apoio reais de uma ponte devido às dificuldades construtivas de se reproduzir as condições ideais consideradas em projeto. A Figura 20 revela que o comportamento real dessas estruturas caracterizam-se em um meio termo entre às condições de apoio simples e engastadas, sugerindo a modelagem desses apoios como molas.

Figura 18 – Filtragem do evento 1, longarina 4

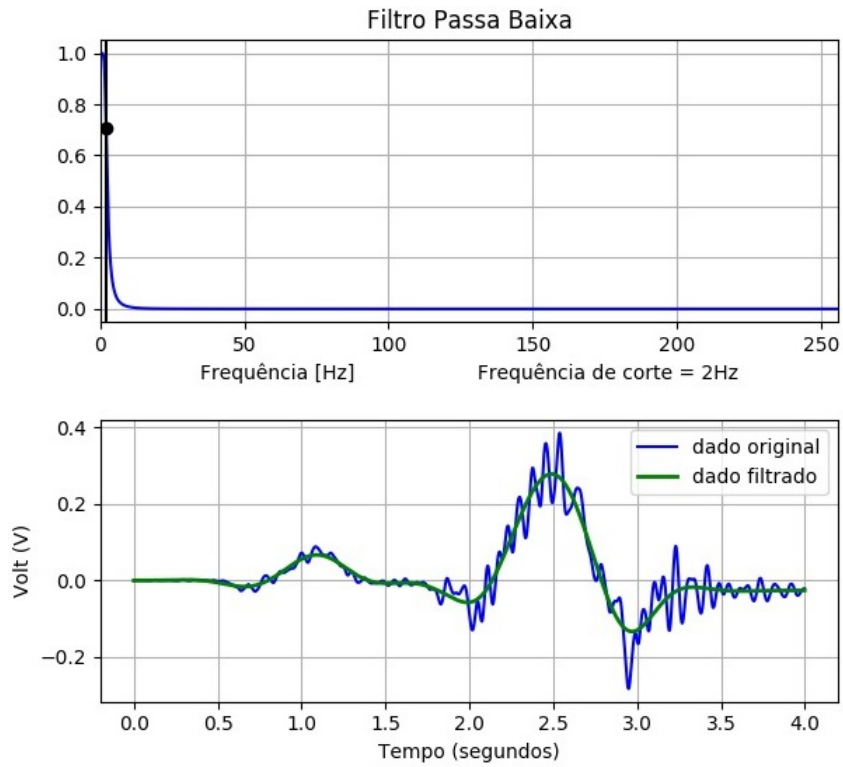


Figura 20 – Comparação entre Linhas de Influência

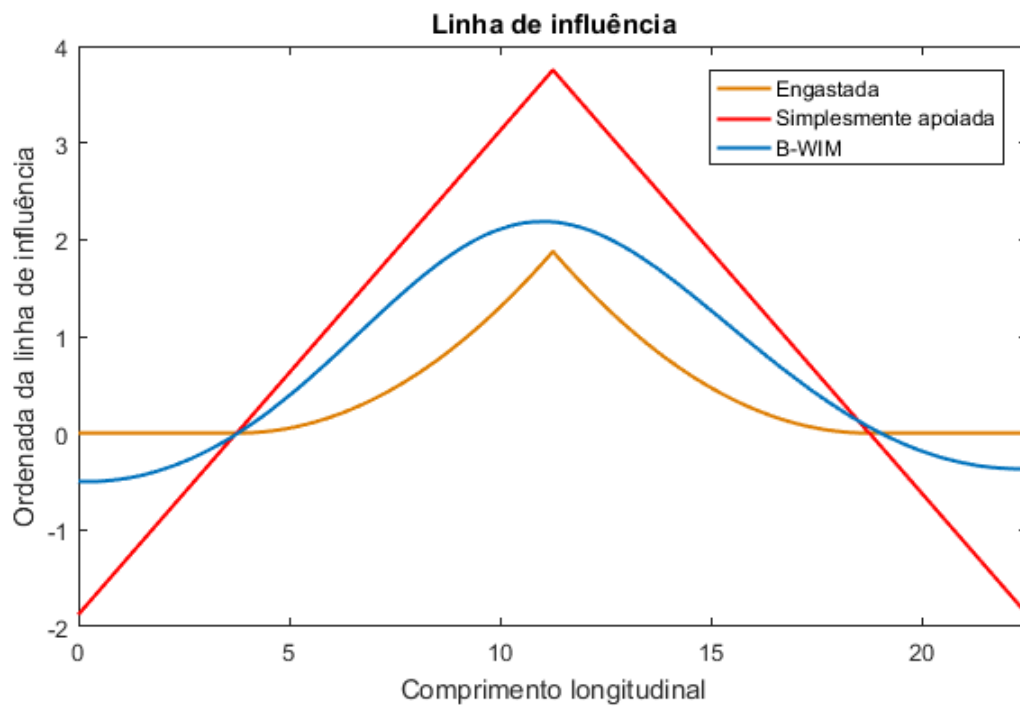
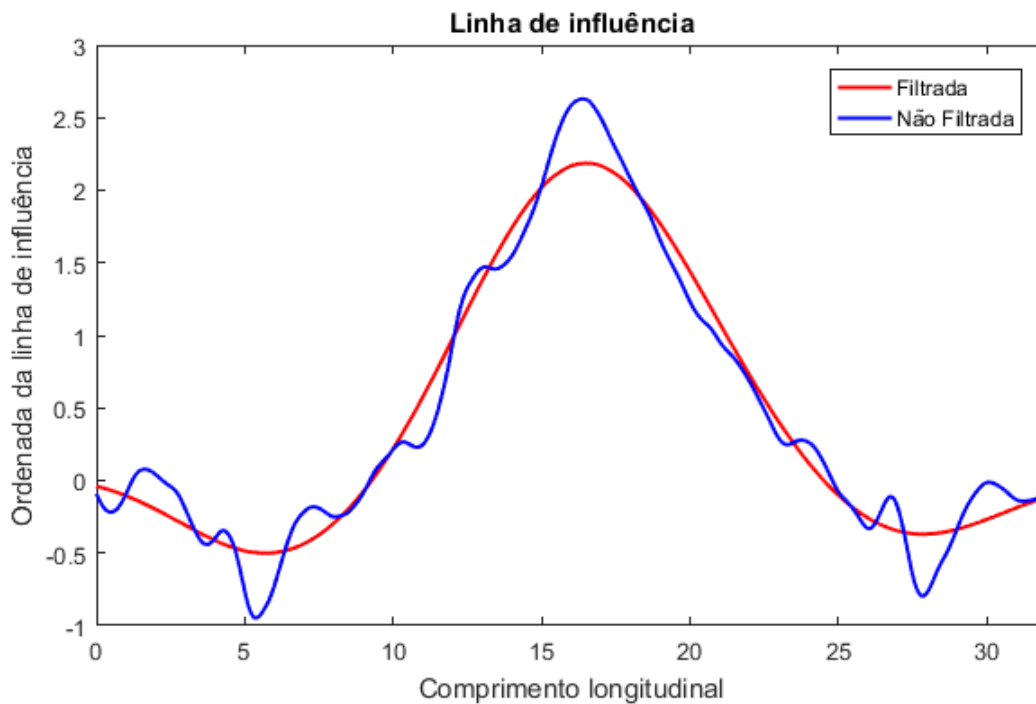


Figura 19 – Linha de influência filtrada média



4.4 MODELAGEM PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A modelagem pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) vem sendo cada vez mais utilizada no projeto de estruturas. Esse método permite avaliar os esforços e deformações de estruturas tridimensionais, levando em consideração o comportamento de todos os elementos constituintes trabalhando em conjunto, mesmo em estruturas mais complexas como, por exemplo, edifícios de grande esbeltez.

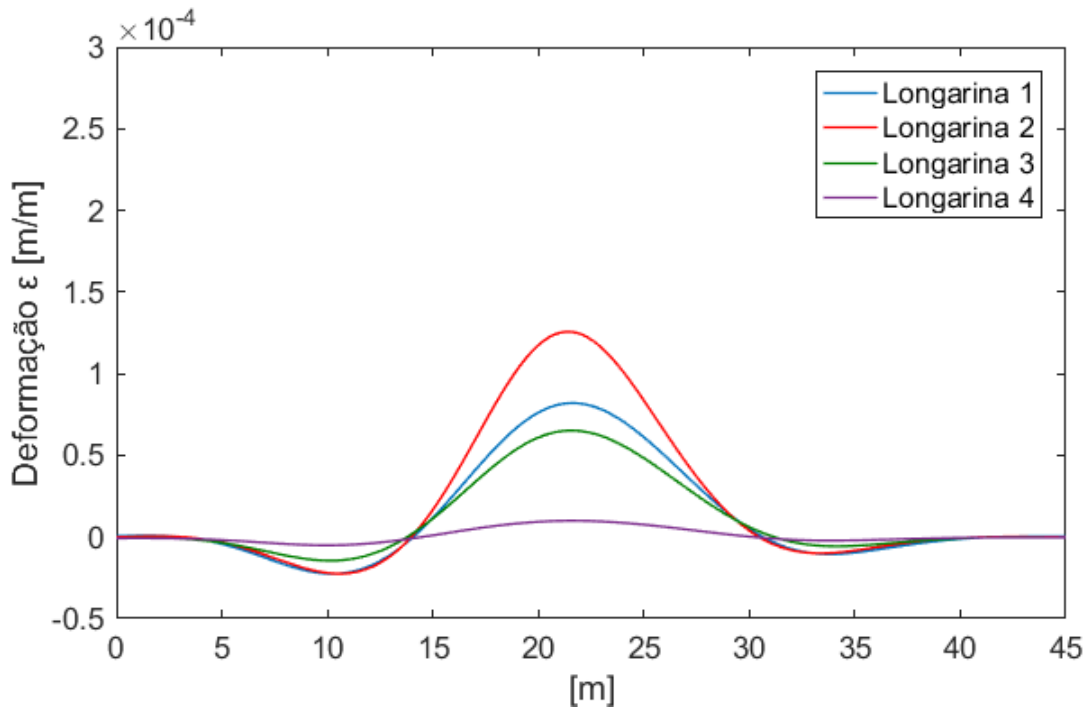
Dessa forma, foi realizada a modelagem da ponte sobre o Rio Lambari a fim de comparar o comportamento da estrutura na teoria com o que acontece na prática. Para isso optou-se por comparar as deformações específicas nos pontos de instalação dos sensores *strain gauges* oferecidos pelo sistema B-WIM e pelo software comercial SAP2000 através das tensões atuantes na estrutura.

As deformações obtidas pelo sistema B-WIM estão contidas nos gráficos das Figuras 21 e 22. As curvas foram geradas a partir dos dados dos eventos filtrados, utilizando uma média dos eventos considerados válidos na seção 4.2.

Foram realizadas 3 modelagens utilizando MEF, uma delas considerando a presença das transversinas e outra desconsiderando esse elemento, ambos modelados com apoio de segundo grau, além de um terceiro modelo que possui a presença das transversinas e apoios de terceiro grau. A modelagem foi feita seguindo as mesmas considerações na aplicação do Algoritmo de Moses, e foram modelados os elementos de laje, longarinas e transversinas, como mostra a Figura 23. Os elementos de laje foram modelados com seção transversal do tipo *shell-thin*, que possui propriedades de casca. As armaduras dos elementos não foram consideradas para que os resultados de deformação específica correspondessem aos mesmos encontrados na aplicação do Algoritmo de Moses, pois a constante de transformação dos sinais para deformação específica foi deduzida por Heinen (6) não levando essas armaduras em consideração. O autor não possuía informações sobre as se-

ções transversais das transversinas e por isso, sua modelagem foi aproximada, utilizando a mesma altura das longarinas, como pode ser observado na Figura 15, e largura de 15cm. Para a definição dos carregamentos foram modeladas as cargas de cada eixo em diversas

Figura 21 – Deformação específica - veículo de 3 eixos.



posições ao longo da estrutura, simulando a passagem de um veículo de 3 eixos sobre a mesma. Foram então selecionados todos os eventos do sistema WIM para comparação com os resultados obtidos pelo MEF. Os pesos de cada eixo na modelagem pelo MEF foram os mesmos utilizados na calibração pelo Algoritmo de Moses. Após finalizada a modelagem no *software*, foram extraídas dos resultados as tensões em todos os elementos de viga e transformadas para deformação específica utilizando a Lei de Hooke, onde a tensão σ se relaciona com a deformação específica ε através do módulo de elasticidade do material E , de acordo com a Equação 4.2

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.2)$$

onde, σ é a tensão em um determinado ponto;

E é o módulo de elasticidade do material ou Módulo de Young;

ε é a deformação específica do material.

Para fins de comparação, foram plotados em um gráfico as deformações específicas obtidas através das tensões nos elementos pelo MEF, no mesmo ponto de instalação dos sensores - no centro da face inferior da longarina e no meio do vão da ponte. No primeiro gráfico representado na Figura 24, foram modelados apenas os elementos de laje e longarinas, já na Figura 25 foram incluídos os elementos de transversina.

Pelas figuras é possível observar que a não utilização de transversinas apresenta deformações e uma distribuição das tensões muito próximas dos resultados obtidos pelo sistema B-WIM. Isso indica que as transversinas da ponte Lambari não estão desempenhando muito bem o papel de distribuição dos esforços entre longarinas, diminuindo a

Figura 22 – Deformação específica - veículo de 5 eixos.

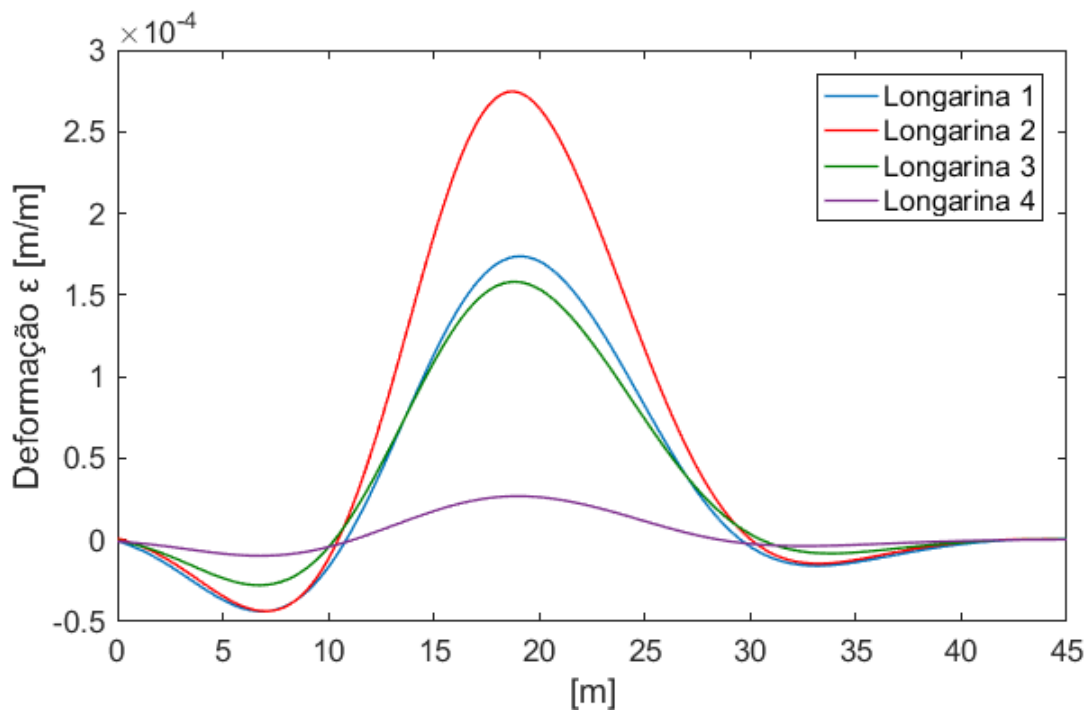
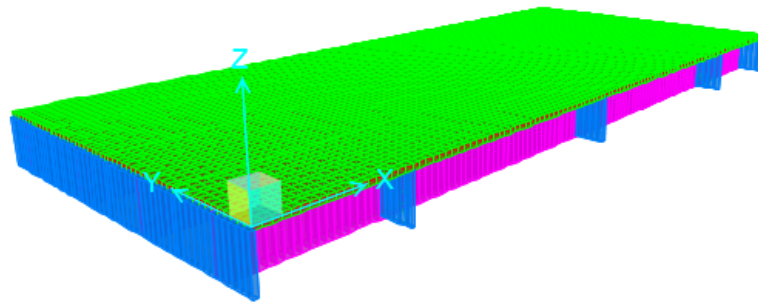


Figura 23 – Modelagem da laje, longarinas e transversinas

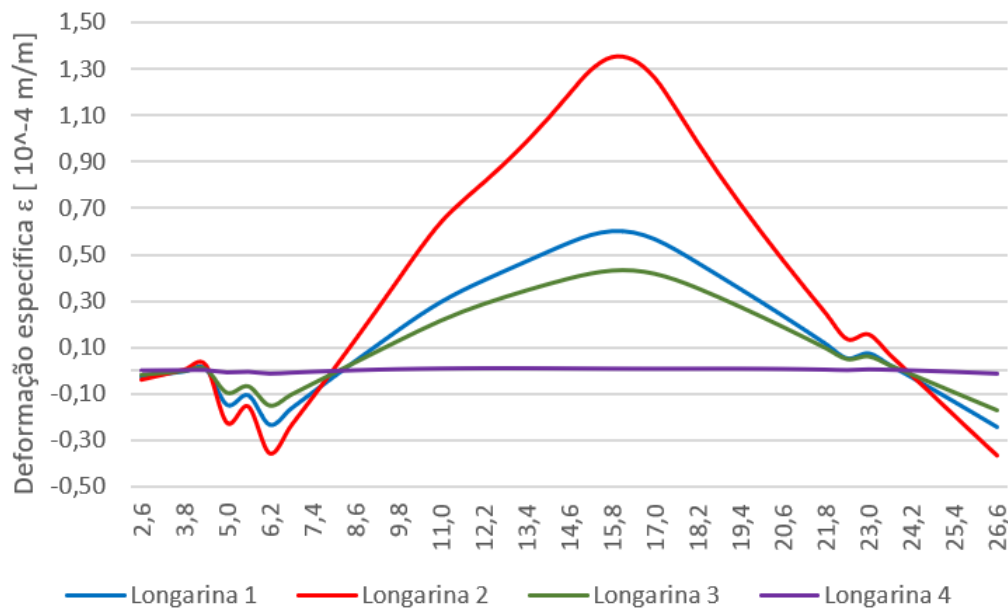


segurança da estrutura, pois uma única longarina deve resistir à maior parte dos esforços sozinha. Na modelagem com transversinas, a utilização de apoios engastados diminuiu drasticamente as deformações específicas como ilustrado na Figura 26. Este mesmo fenômeno também ocorre na ausência de transversinas, e sugere mais uma vez que os apoios reais da ponte pertencem à uma situação intermediária aos apoios do tipo engastados e simplesmente apoiados.

4.5 INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE DEFEITOS NO PAVIMENTO E CABECEIRAS

A não regularidade da camada de pavimentação é um fato que não pode ser ignorado quando se projeta uma ponte, tanto que a NBR 7188:2013 (12) apresenta o conceito de Coeficiente de Impacto Adicional (CIA), que consiste em um coeficiente destinado à majoração da carga móvel característica devido à imperfeição e/ou descontinuidade da

Figura 24 – Deformações específicas do modelo composto por laje, longarinas e poio de segundo grau



pista de rolamento, como por exemplo, juntas de dilatação e nas extremidades das obras, estruturas de transição e acessos. Este coeficiente vale 1,25 para estruturas em concreto ou mistas, ou seja, aumenta a carga móvel característica em 25%.

Entretanto, este coeficiente não foi criado para garantir a segurança de pontes onde não são realizadas as manutenções necessárias em sua vida útil. O surgimento de defeitos na pista como buracos e os desníveis nas cabeceiras devido ao adensamento do solo são problemas comuns e que devem receber a atenção necessária, tanto para a segurança da estrutura quanto para o usuário, devido a instabilidade na direção do veículo que pode causar danos ao automóvel e acidentes.

Como mencionado anteriormente, a ponte sobre o Rio Lambari possuía durante o período de calibração, em um de seus sentidos de tráfego, um defeito na pista de rolamento caracterizado por um desnível de aproximadamente 3cm. Os efeitos deste defeito serão avaliados através da comparação dos picos de deformação específica ϵ do sentido defeituoso e do sentido em condições normais.

Foram então gerados os gráficos da deformação específica média referentes aos sentidos de tráfego e número de eixos. Para fins comparativos foram selecionadas as deformações da longarina mais solicitada em ambos os casos. A longarina 2 para o sentido Uruaçu e a longarina 3 para o sentido Porangatu, como mostram as Figuras 27 e 28.

Figura 25 – Deformações específicas do modelo de laje, longarinas, transversinas, simplesmente apoiada

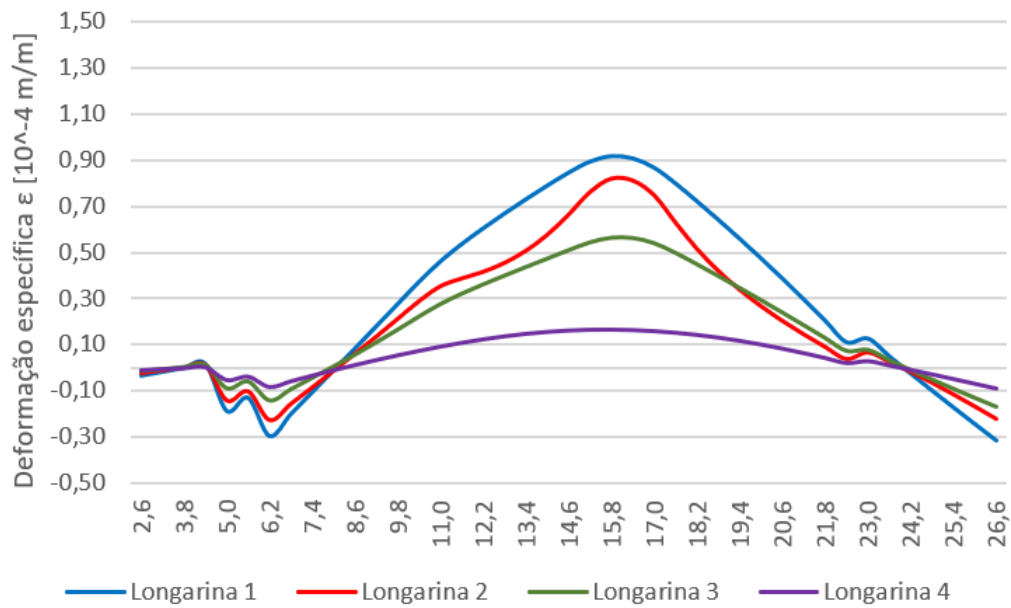
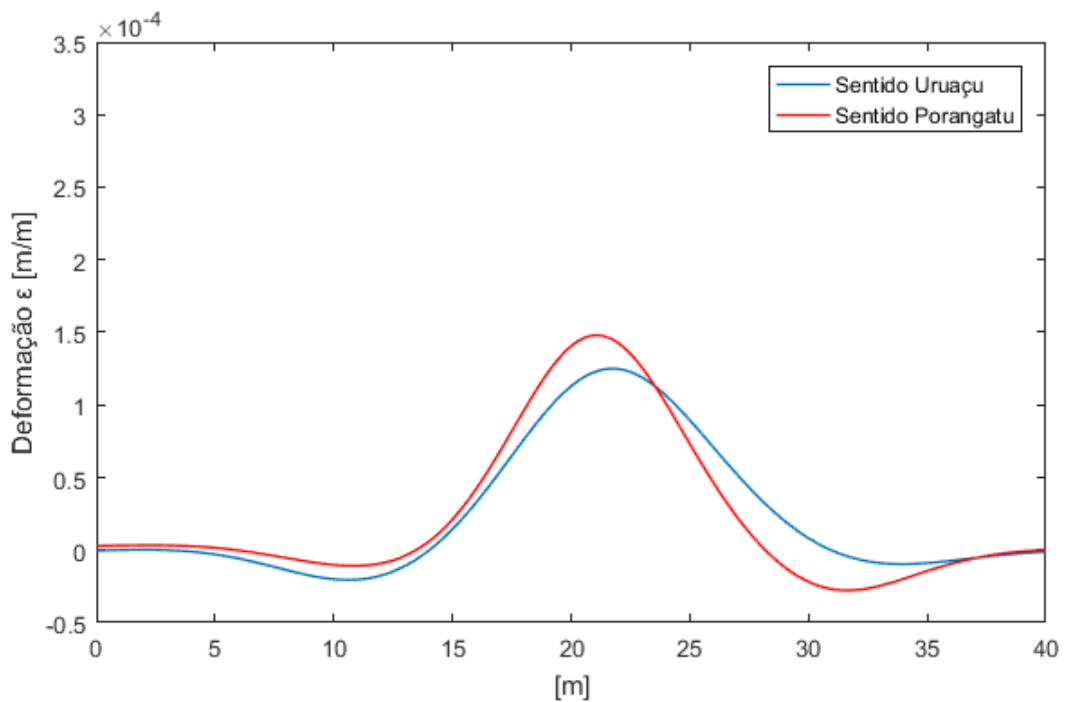


Figura 27 – Deformações específicas da longarina mais solicitada



Em ambos os casos, o sentido que gerou uma maior deformação, resultante de um maior esforço das longarinas, em termos de momentos fletores, foi o sentido onde foi registrada a presença do desnível.

Figura 26 – Deformações específicas do modelo de laje, longarinas, transversinas, engastada

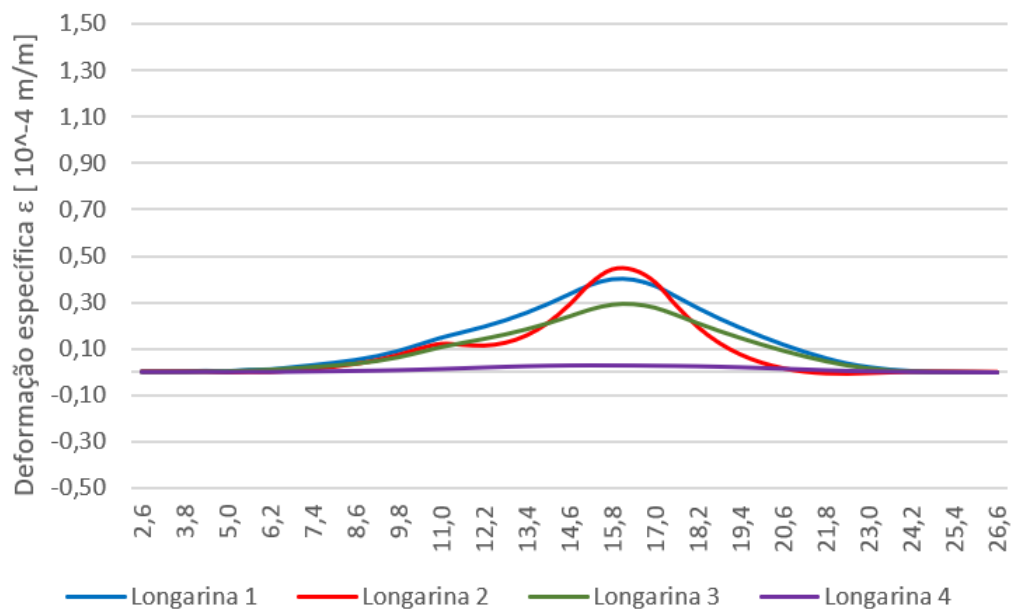
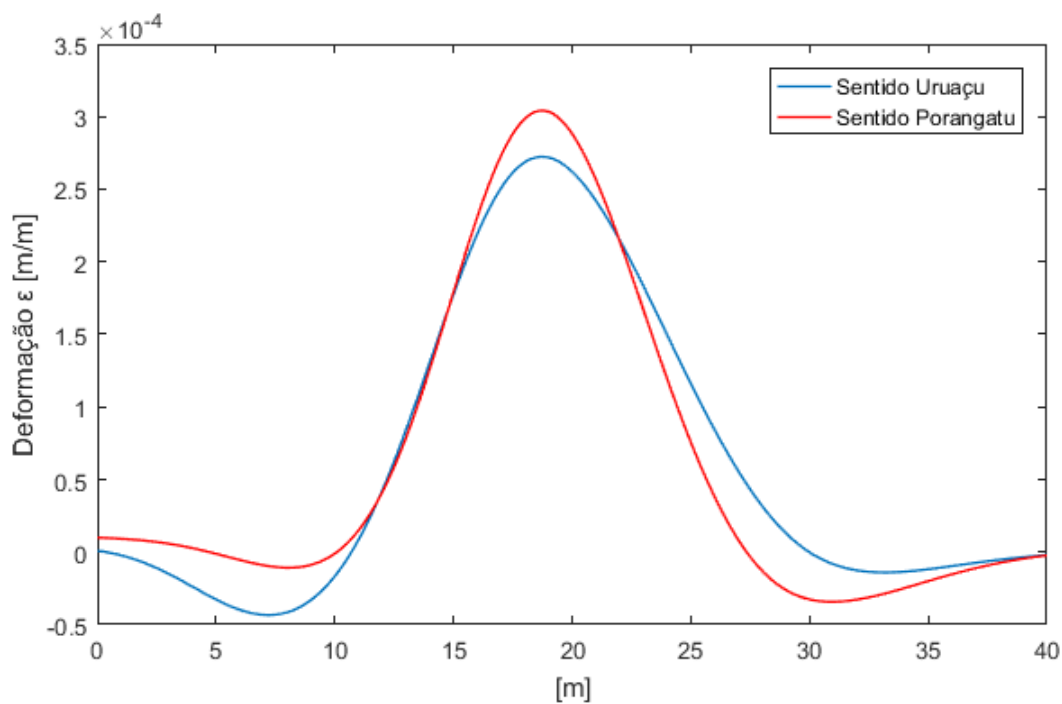


Figura 28 – Deformações específicas da longarina mais solicitada



Comparando agora os pontos de máximo dos gráficos das Figuras 27 e 28, e sabendo-se que a tensão é diretamente proporcional à deformação de acordo com a Lei de Hooke (Equação 4.2), o desnível na pista proporcionou um aumento da tensão máxima em 11,50 % para o veículo de 3 eixos e 18,43% para o veículo de 5 eixos. Os valores dos

máximos para cada situação podem ser conferidos na Tabela 2.

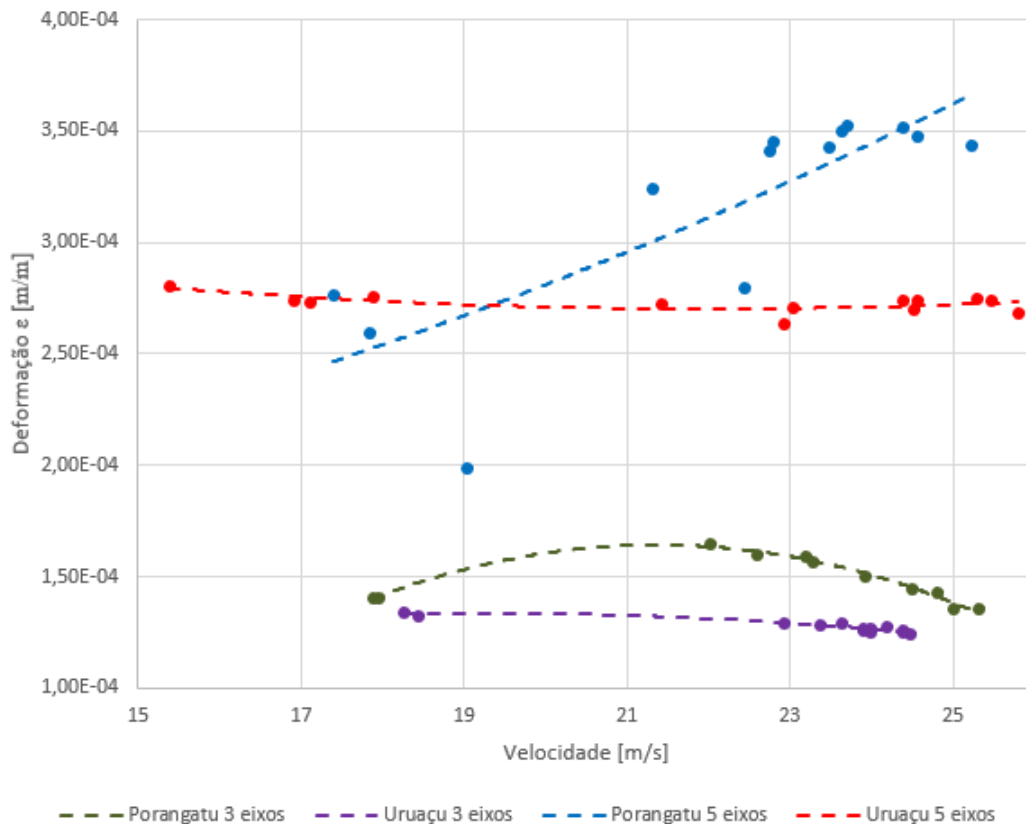
Tabela 2 – Máximos de deformação específica ε

Número de eixos	Sentido Uruaçu	Sentido Porangatu	Diferença %
3 eixos	1,25e-04	1,48e-04	18,43
5 eixos	2,73e-04	3,04e-04	11,50

Lembrando que o efeito dinâmico já havia sido filtrado e portanto a parcela dinâmica possui proporções maiores que as apresentadas nesta comparação, reforçando mais uma vez que o acréscimo de 25% na carga móvel característica não existe para garantir a segurança por condições geradas pela falta de manutenção. Além disso, os valores apresentados na Tabela 2 representam uma média das deformações específicas desses eventos, havendo eventos onde os máximos das deformações foram maiores.

Além do aumento das tensões devido ao efeito dinâmico produzido por essa irregularidade na pista, foram observadas como essas deformações se relacionam com a velocidade de passagem do veículo de calibração na situação normal e com o desnível. Foi gerado então o gráfico da Figura 29 que relaciona a deformação ε e a velocidade em metros por segundo, adicionada uma linha de tendência polinomial de segundo grau para cada uma das 4 situações.

Figura 29 – Gráfico deformação específica ε x Velocidade



Apesar da pequena amostra de valores experimentais este gráfico demonstra a influência do desnível na deformação ε relacionada com o aumento da velocidade para

o veículo de 5 eixos, enquanto que para as outras situações a deformação permaneceu praticamente constante. Este aumento pode estar relacionado à dois fatores: sobreposição dos efeitos do impacto gerado pelo desnível em cada um dos eixos relacionado com a distância entre eles e a frequência da ocorrência desses impactos que aumenta com a velocidade do veículo. Para determinar com precisão este comportamento seria necessário uma amostra maior de dados ou realizar simulações de falsos defeitos na pista em diversos locais ao longo do tabuleiro e avaliar a influência de cada um deles.

4.6 ANÁLISE DA OBTENÇÃO DOS PESOS DOS EIXOS E PBT

O principal objetivo do B-WIM é a obtenção dos pesos dos eixos dos veículos que trafegam sobre as pontes e viadutos. Nas Tabelas 3 e 4 estão descritos os resultados obtidos com a aplicação do Algoritmo de Moses apresentado na Seção 3.1.3 para ambos os sentidos.

Tabela 3 – Pesos dos eixos e PBT para o veículo de 3 eixos em kN

Situação	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	PBT	E % PBT
3 eixos estático	46.70	108.65	108.65	263,99	
3 eixos Uruaçu	46,74	108,48	108,80	264,01	0,0076
3 eixos Porangatu	46,77	108,30	108,97	264,04	0,0190

O Algoritmo apresentou resultados muito bons comparando-os com os pesos estáticos dos eixos de cada veículo, principalmente no que diz respeito ao PBT, onde houveram diferenças no Erro % menores que 0,01 % no sentido Uruaçu.

Os resultados referentes ao sentido Porangatu foram calculados utilizando a LI que representa este mesmo sentido, caracterizando uma situação onde o sistema é calibrado com a presença do desnível e não representa o Erro % com o aparecimento futuro de defeitos na camada de pavimentação. Ainda assim, este sentido de tráfego apresentou um Erro % maior, mas ainda sim, não prejudicial caso utilizado no processo de triagem de sobrecarga.

Tabela 4 – Pesos dos eixos e PBT para o veículo de 5 eixos em kN

Situação	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4	Eixo 5	PBT	E % PBT
5 eixos estático	51,80	53,50	87,56	87,56	87,56	367,99	
5 eixos Uruaçu	51,72	53,60	87,66	87,21	87,77	367,97	0,0054
5 eixos Porangatu	51,69	53,64	87,26	87,94	87,41	367,93	0,0163

Os resultados apresentados anteriormente demonstram uma precisão do sistema B-WIM, permitindo sua utilização nas OAE em todo o país, como complemento à fiscalização de sobrecarga de veículos pesados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHO FUTUROS

Este trabalho abordou a tecnologia do sistema B-WIM aplicada em uma ponte já existente, comparando os resultados do sistema com a formulação teórica de LI e apresentando resultados condizentes com a realidade. A LI real da estrutura se encontrou em uma situação intermediária aos casos teóricos de pontes engastadas e bi-apoiadas, reforçando o fato de que a execução nunca consegue reproduzir as mesmas considerações feitas na etapa de projeto.

Na etapa de pesagem em movimento com a própria LI média dos eventos, o erro % obtido entre o PBT estático e o PBT medido foram em sua grande maioria menores que 0,01%, provando que a utilização do Algoritmo de Moses apresenta resultados satisfatórios e passíveis de sua utilização como ferramenta de fiscalização do tráfego viário pesado.

Outro ponto importante discutido neste trabalho é a influência de defeitos comuns na camada de pavimentação, que refletem em um considerável aumento das tensões atuantes nas longarinas, comprometendo a segurança da estrutura. Entretanto, serão necessários outros estudos para mensurar o quanto a presença desses defeitos influenciam na segurança da estrutura. De qualquer forma, as manutenções da camada de pavimentação, encontros nas cabeceiras e juntas de dilatação são extremamente necessárias, como dito anteriormente, para evitar a ocorrência de acidentes relacionados à direção dos veículos.

Por fim, reforça-se a multifuncionalidade do sistema B-WIM que além da pesagem em movimento proporciona a contabilização do número de eixos de cada veículo e o sentido de tráfego dos mesmos. Além disso, a utilização de um sistema de monitoramento instalado junto à estrutura proporcionaria uma caracterização completa do tráfego viário e um sistema eficiente de aplicação de penalizações por excessos de velocidade e peso.

O sistema B-WIM é uma tecnologia muito ampla e que necessita de estudos complementares de forma a otimizar ao máximo a sua aplicação. Por este motivo sugere-se para trabalhos futuros:

- Um estudo aprofundado relacionado à filtragem de sinais e frequência natural de pontes;
- A determinação da capacidade de carga da estrutura e da sua segurança através do sistema B-WIM;
- Uma análise mais profunda da presença de defeitos na camada de pavimentação e estrutura;
- Um estudo sobre a passagem de múltiplos veículos pelo tabuleiro simultaneamente.

REFERÊNCIAS

- 1 BURNOS, Piotr; GAJDA, Janusz. Thermal Property Analysis of Axle Load Sensors for Weighing Vehicles in Weigh-in-Motion System. **Sensors**, v. 16, n. 12, 2016. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2143>>. Nenhuma citação no texto.
- 2 COST323. Weigh-in-Motion of Road Vehicles - Final Report. **Appendix 1: European WIM Specification**, 1999. Citado 1 vez na página 46.
- 3 DNIT. **Pesquisa Nacional de Tráfego 2017**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Pnt/2017>>. Citado 1 vez na página 43.
- 4 DNIT; UFSC; LABTRANS. Aplicação da Metodologia Brasileira para Inspeção e para a Segurança de Obras de Arte Especiais. **Termo de execução descentralizada TED-935/2014**, 2017. Citado 1 vez na página 43.
- 5 GIOVANNETTI, A.C.V.P. **Avaliação do estado de conservação de pontes: estudo de caso**. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 25, 43, 45.
- 6 HEINEN, S.K. **Efeito da distribuição transversal das cargas na obtenção de linhas de influência reais usando um sistema de pesagem em movimento em pontes**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Citado 3 vezes nas páginas 34, 44, 51.
- 7 ISWIM. **What is WIM and history**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.is-wim.org/index.php?nm=2&nsm=1&lg=en>>. Citado 1 vez na página 27.
- 8 JUNGES, Paulo; PINTO, R. C. A.; FADEL MIGUEL, L. F. B-WIM systems application on reinforced concrete bridge structural assessment and highway traffic characterization. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v.10, n.6,2017, p. 1338-1365. Citado 1 vez na página 49.
- 9 _____. Linha de Influência Real de Pontes Utilizando sistemas BWIM. **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto, Natal**, 2014. Citado 1 vez na página 25.
- 10 MOSES, Fred. Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges. **Transportation Engineering Journal of ASCE**, v.105, n.3,1979, p. 233-249. Citado 3 vezes nas páginas 25, 29, 34.
- 11 QUILLIGAN, M. M. Bridge weigh-in-motion – development of a 2-D multivehicle algorithm. **Royal Institute of Technology, Sweden**, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 30, 36.
- 12 TÉCNICAS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre, Rio de Janeiro. 2013. Citado 1 vez na página 53.
- 13 ZHAO, H.; UDDIN, N. Algorithm to identify axle weights for an innovative BWIM system - Part I. **Joint Conference On Advances In Bridge Engineering-II. Dhaka, Bangladesh**, 2010. Citado 1 vez na página 36.
- 14 _____. Algorithm to identify axle weights for an innovative BWIM system - Part II. **Joint Conference On Advances In Bridge Engineering-II. Dhaka, Bangladesh**, 2010. Citado 1 vez na página 41.

Apêndices

APÊNDICE A – RESTRIÇÕES DOS EVENTOS

Evento	Sentido	Número de eixos	Erro % PBT	Desvio máximo da LI	Resultado
1	Uruaçu	3	0.0339	0.2067	✓
2	Uruaçu	5	0.0002	0.3077	✓
3	Porangatu	3	-	-	x
4	Porangatu	5	-	-	x
5	Uruaçu	8	-	-	x
6	Uruaçu	3	0.0323	0.1732	✓
7	Uruaçu	5	0.0615	0.3431	✓
8	Porangatu	3	-	-	x
9	Porangatu	15	-	-	x
10	Porangatu	5	-	-	x
11	Uruaçu	3	0.0519	0.1340	✓
12	Uruaçu	5	0.0054	0.1734	✓
13	Porangatu	3	-	-	x
14	Porangatu	5	-	-	x
15	Uruaçu	3	0.0657	0.1610	✓
16	Uruaçu	5	0.2439	-0.0853	✓
17	Uruaçu	3	0.0599	-1.8900	x
18	Porangatu	10	-	-	x
19	Porangatu	5	-	-	x
20	Uruaçu	3	0.0481	0.3099	✓
21	Uruaçu	5	0.0003	0.4307	✓
22	Porangatu	3	-	-	x
23	Porangatu	5	-	-	x
24	Uruaçu	3	0.0543	0.2674	✓
25	Uruaçu	5	0.0367	0.0875	✓
26	Porangatu	3	-	-	x
27	Porangatu	5	-	-	x
28	Uruaçu	3	0.0467	0.0245	✓
29	Uruaçu	5	0.0010	0.0755	✓
30	Porangatu	3	-	-	x
31	Porangatu	5	-	-	x
32	Uruaçu	6	-	-	x
33	Uruaçu	5	0.0001	-0,1626	✓
34	Porangatu	3	-	-	x
35	Porangatu	5	-	-	x
36	Uruaçu	3	0.0249	-0.1236	✓
37	Porangatu	5	-	-	x
38	Porangatu	3	-	-	x
39	Porangatu	5	-	-	x
40	Uruaçu	3	0.1124	-0.0117	x
41	Uruaçu	12	-	-	x
42	Uruaçu	5	0.0121	-0.2691	✓
43	Uruaçu	3	0.0494	-0.2993	✓
44	Uruaçu	5	0.0103	-0.1876	✓
45	Porangatu	3	-	-	x
46	Porangatu	5	-	-	x
47	Uruaçu	3	0.0861	0.1832	✓
48	Uruaçu	5	0.0009	0.3579	✓

Evento	Sentido	Número de eixos	Erro % PBT	Desvio máximo da LI	Resultado
49	Porangatu	3	-	-	x
50	Uruaçu	3	0.0033	-0.2158	✓
51	Uruaçu	5	0.0338	0.1111	✓
52	Porangatu	3	-	-	x
53	Porangatu	5	-	-	x
54	Uruaçu	3	0.0017	-0.2177	✓
55	Uruaçu	5	0.0216	0.3135	✓
56	Porangatu	3	-	-	x
57	Porangatu	5	-	-	x
58	Uruaçu	3	0.0453	-0.2903	✓
59	Uruaçu	5	0.0532	0.0918	✓
60	Porangatu	5	-	-	x
61	Porangatu	5	-	-	x