

Sabrina Kalise Heinen

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DAS CARGAS
NA OBTENÇÃO DE LINHAS DE INFLUÊNCIA REAIS USANDO
UM SISTEMA DE PESAGEM EM MOVIMENTO EM PONTES**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD.

Florianópolis – SC
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Heinen, Sabrina Kalise

Efeito da distribuição transversal das cargas na
Obtenção de linhas de influência reais usando um
sistema de pesagem em movimento em pontes / Sabrina
Kalise Heinen; orientador, Roberto Caldas de Andrade
Pinto - Florianópolis, SC, 2016.

148 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. BWIM. 3. avaliação de
pontes. 4. linhas de influência. 5. distribuição
transversal do carregamento. I. Pinto, Roberto Caldas
de Andrade. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

Sabrina Kalise Heinen

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DAS CARGAS
NA OBTENÇÃO DE LINHAS DE INFLUÊNCIA REAIS USANDO
UM SISTEMA DE PESAGEM EM MOVIMENTO EM PONTES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Florianópolis, 15 de junho de 2016.

Prof. Glicerio Triches, Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.
Examinador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rafael Holdorf, Dr.
Examinador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa, PhD.
Universidade Estadual de Campinas

Aos meus pais, irmã e a todos que me acompanharam nesta fase e sempre me incentivaram a buscar o conhecimento:

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, a quem sempre pedi sabedoria, persistência e paciência para que pudesse concluir meus estudos e o presente trabalho com êxito. Agradeço por me dar força e permitir dar conta de todos os afazeres que tive neste tempo com o sucesso que almejei. Agradeço por acompanhar meus passos e ajudar em minhas decisões.

A todos meus professores responsáveis pela minha formação, que são também meu exemplo e inspiração. Em especial ao meu orientador Roberto Pinto, que me permitiu trabalhar com as pontes que tanto quis e ajudou bastante a entender alguns conceitos deste sistema de pesagem em movimento até então desconhecido por mim. Agradeço pela paciência e tempo investido neste trabalho e por me orientar bem como já fez desde a graduação.

A meus familiares e amigos que, embora não entendessem muito sobre linhas de influência de pontes e algoritmos, sempre mostraram interesse e apoiaram minha decisão de fazer mestrado. Aos meus pais, Gerson e Shirlei, que me deram muito carinho, que perguntaram em todas as ligações como estava indo meu mestrado, que estarão certamente orgulhosos da filha. E especialmente à minha irmã, Karen, com quem mais estive nos últimos anos, que também segue na vida acadêmica em outra engenharia, cuja companhia sempre me fez bem.

Por fim, a todos meus colegas e amigos especiais que fiz nestes últimos anos, que preencheram meus dias com momentos felizes. A todos os frequentadores do Grupex, nossa salinha em vezes não tão produtiva quanto deveria, pois em meio aos estudos é preciso conversar um pouquinho. Meus mestrandos e doutorandos queridos, meu muito obrigado por caminharmos juntos nesta jornada.

“As pessoas são solitárias porque
constroem muros ao invés de pontes.”
(Antoine de Saint Exupéry)

RESUMO

Os sistemas de pesagem em movimento em pontes (Bridge Weigh in Motion – BWIM) foram desenvolvidos para obter as cargas móveis em pontes e como consequência a segurança da estrutura pode ser melhor avaliada. Com o sistema BWIM é possível obter linhas de influência (LI) reais, a partir de medidas das deformações que ocorrem quando um caminhão de peso conhecido trafega sobre a ponte. Sensores de deformação são instalados sob a estrutura e os sinais adquiridos são processados utilizando o Algoritmo de Moses, obtendo-se uma LI para o sistema, assumindo que todas as vigas tenham o mesmo comportamento estrutural. Esta consideração não é sempre correta, pois as vigas podem ter tamanhos diferentes e/ou um diferente estado de degradação. Além disso, a distribuição transversal das cargas das rodas em cada viga, caracterizando um comportamento bidimensional da ponte com vigas e lajes, não é considerada. Este estudo usa medidas obtidas por um sistema BWIM instalado em uma ponte brasileira no estado de Goiás para obter as LIs reais utilizando o algoritmo tradicional e o algoritmo implementado considerando o efeito de transversalidade das cargas. Neste caso, considera-se que cada viga recebe uma parcela da carga móvel, possibilitando o cálculo de LIs diferentes para cada uma. Estudou-se também a possibilidade de filtrar o sinal de deformação na obtenção de LIs. As LIs obtidas são comparadas às teóricas e utilizadas para cálculo dos pesos dos veículos. Desta forma é possível avaliar a precisão dos resultados obtidos pelos dois algoritmos. Os erros do peso bruto total calculado em relação ao real são ligeiramente inferiores quando considerado o comportamento bidimensional. Os coeficientes de distribuição transversal do carregamento são comparados aos obtidos por métodos teóricos, comprovando a eficiência do método para o peso total.

Palavras-chave: avaliação estrutural, BWIM, linhas de influência, distribuição transversal do carregamento, comportamento bidimensional.

ABSTRACT

Bridge weigh-in-motion (BWIM) systems have been developed to evaluate the actual live load in bridges; as a consequence, the overall structural safety can be better assessed. BWIM systems yield the real influence lines based on strain measurements when a truck with known weight travels over the bridge. Sensors are mounted on the inner surface of the bridge girders. The acquired strain signals are, then, processed using Moses algorithm yielding the influence line for the bridge system. It is assumed that all girders have the same structural behavior. This assumption does not always hold since girders may have different sizes and be in a different state of deterioration. Also, the transversal distribution of the wheel loads on each girder, which characterizes a 2D behavior of the slab-girder bridge, is not considered. This study used BWIM measurements obtained from a Brazilian bridge in Goiás state to obtain real influence lines by using the traditional algorithm and the algorithm implemented considering the transversal load distribution. In this latter case, each girder receives a portion of the total load, making it possible to calculate different influence lines for each one. Additionally, the possibility of smoothing the influence lines by filtering the strain signal was studied. The calculated influence lines could be compared to the theoretical ones, and also used to predict the weight of vehicles, which makes it possible to assess the accuracy of the results obtained by both algorithms. Considering a 2D behavior, the difference between the calculated gross vehicle weight and the real one decreased. The transversal distribution factors were also compared to some theoretical models proving the efficiency of this method for the total weight.

Key-words: structural assessment, BWIM, influence lines, transversal load distribution, 2D behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Veículos tipo de acordo com a NBR 7188-2013.	25
Figura 2 - veículos comuns nas rodovias brasileiras	26
Figura 3 - Pontes com a instalação do sistema BWIM – (a) Ponte em laje (b) Ponte com várias longarinas	27
Figura 4 - Linhas de influência das reações de apoio, momento fletor e esforço cortante numa seção S de uma viga biapoiada.	34
Figura 5 - Comportamentos da laje com carregamento excêntrico. (b) Com rigidez infinita (c) Com rigidez nula	35
Figura 6 - Deformação de corpo rígido devido à aplicação de carga excêntrica. (b) Translação (c) Rotação.....	37
Figura 7 - Aplicação do método de Leonhardt.....	38
Figura 8 - Esquema estrutural transversal para uma faixa unitária	40
Figura 9 - Comparação entre os fatores dos modelos de acordo com Almeida (2015)	43
Figura 10 - Pórticos para seções transversais de diferentes pontes	45
Figura 11 - Sistema WIM para pré-selecionar veículos excessivamente carregados	47
Figura 12 - Instalação de sistema WIM com sensores piezoelétricos. ...	48
Figura 13 - Sistema BWIM usando uma ponte como balança.	51
Figura 14 - Culway na Albany Highway.....	53
Figura 15 - Obtenção do momento fletor a partir da LI pra um veículo de 4 eixos.....	56
Figura 16 - Obtenção das leituras de deformação com a passagem do caminhão	59
Figura 17 - Cargas axiais atuando sobre a ponte, distâncias L_i e ordenadas da LI.....	60
Figura 18 – Exemplo de sinal elétrico obtido como resposta do extensômetro para caminhão de 3 eixos.....	60
Figura 19 – LIs ajustadas do momento fletor na seção no meio do vão para pontes simplesmente apoiadas e completamente restringida.....	63
Figura 20 - Matriz A para veículo de 5 eixos.....	67
Figura 21 - Sinais de sensores FAD	69
Figura 22 - Exemplos de pontes instrumentadas e sinais obtidos.	74
Figura 23 - Distribuição transversal de cargas	82
Figura 24 - Superfície de influência do momento fletor no centro de uma placa retangular simplesmente apoiada (em visão espacial e coordenadas isométricas).	87
Figura 25 - Fotos da ponte sobre o Rio Lambari.....	92

Figura 26 - Corte lateral da ponte (dimensões em cm)	93
Figura 27 - Seção transversal da superestrutura da ponte (em cm).....	93
Figura 28 - Seção transversal das longarinas	93
Figura 29 - Instalação do sistema BWIM	94
Figura 30 - Posição dos sensores na ponte Lambari	95
Figura 31 - Comparação entre momentos e deformações medidas.....	96
Figura 32 - Sinal de deformação de sensores FAD obtido com a passagem de um caminhão de 3 eixos no evento 1	98
Figura 33 - Sinal de deformação de sensores FAD obtido com a passagem de um caminhão de 5 eixos no evento 9	100
Figura 34 - Deformações nas vigas no evento 1	101
Figura 35 - Deformações nas vigas no evento 9	101
Figura 37 - Sinal 1 filtrado, no domínio da frequência	105
Figura 38 - Comparação entre sinal real e filtrado para o evento 1	106
Figura 40 – Comparação entre sinais reais e filtrados do evento 1 para o algoritmo 2	107
Figura 41 - Comparação entre as linhas de influência – Algoritmo 1.	109
Figura 42 - Comparação entre as linhas de influência - Algoritmo 2 .	110
Figura 43 - Erro médio absoluto no PBT para diferentes números de leituras usadas para cálculo da distribuição transversal	115
Figura 44 - LI média filtrada para o algoritmo 1	116
Figura 45 - LIs médias filtradas de cada viga obtidas com o algoritmo 2	118
Figura 46 - LIs médias filtradas obtidas com o algoritmo 2	119
Figura 47 - Deformação das vigas para o primeiro evento	121
Figura 48 - Posição transversal das rodas do caminhão sobre a ponte	122
Figura 49 - Obtenção dos fatores de distribuição por viga usando Leonhardt	123
Figura 50 - Deformação da seção transversal da ponte usando o método de Fauchart.....	124
Figura 51 - Pórtico para cálculo da distribuição transversal segundo Li e Chen, 2011	125
Figura 52 - Deformação da seção transversal da ponte conforme métodos de cálculo apresentados	127
Figura 53 - Linhas de influência do primeiro e nono eventos.....	138
Figura 54 - LI do primeiro evento considerando apenas 36 m.....	141
Figura 55 - Linha de influência média obtida com o Algoritmo 1	142
Figura 56 - Linhas de influência de cada viga obtidas para o evento 1 com Algoritmo 2	145
Figura 57 - Linhas de influência médias obtidas com o Algoritmo 2 .	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de cargas	32
Tabela 2 - Fatores de distribuição de cada viga para cada modelo de acordo com Almeida (2015).....	42
Tabela 3 - Tolerâncias das classes de precisão de acordo com COST323 1999.....	49
Tabela 4 - Critérios de seleção de uma ponte para análises BWIM	71
Tabela 5 - Características dos veículos de calibração em Uruaçu.....	95
Tabela 6 – Velocidades dos veículos e erro nas distâncias entre eixos calculadas	97
Tabela 7 - Instantes em que ocorrem os picos de deformação nos sensores FAD no evento 1.....	99
Tabela 8 – Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 1 em relação ao peso real (em %).....	112
Tabela 9 – Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 2, $m=50$, considerando todas as vigas, em relação ao peso real (em %)	113
Tabela 10 – Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 2, desconsiderando a última viga, em relação ao peso real (em %)	114
Tabela 11- Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 1 em relação ao peso real a partir da LI filtrada (em %)	117
Tabela 12 - Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 2 em relação ao peso real a partir das LIs filtradas (em %).....	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BWIM – *Bridge Weigh in Motion*

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FAD – *Free of Axle Detectors*

LI – Linha de Influência

MEF – Método dos Elementos Finitos

PBT – Peso Bruto Total

WAVE – *Weighing in motion of Axles Vehicles for Europe*

WIM – *Weigh in Motion*

LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta_{\text{transversal}}$ = deslocamento vertical da viga

$\delta_{\text{rotação}}$ = deslocamento angular da viga

n = número de longarinas

κ = rigidez das longarinas

x_i = distância do centro da ponte até a viga em análise

θ = ângulo de rotação

I_L = inércia das longarinas

I_T = inércia das transversinas

J = inércia polar das longarinas

L = vão das longarinas

L_{ponte} = comprimento total da ponte

S = espaçamento entre longarinas

ζ = coeficiente de rigidez – método de Leonhardt

A = área das longarinas

W = módulo de rigidez das longarinas

E = módulo de elasticidade secante do material da ponte

G = módulo de elasticidade transversal

t = espessura da laje

e_g = distância entre o centro geométrico da viga até o centro da laje

$K_g = I + Ae_g^2$ - rigidez da longarina – método da AASHTO

de = distância do caminhão até a borda da ponte

w = distância entre a primeira viga interna e a borda da ponte

g = coeficientes de distribuição transversal – método da AASHTO

R_i = coeficientes de distribuição transversal – método de Coubon

r_{ij} = coeficientes de distribuição transversal – método de Leonhardt

k_v = coeficiente de mola vertical

k_t = coeficiente de mola transversal

M_{ST} = momento solicitante teórico

M_{SE} = momento solicitante experimental

P_i = peso de cada eixo do caminhão

\mathbf{P} = vetor com os pesos dos eixos do caminhão

N = número de eixos do caminhão

I_i = valor da ordenada da linha de influência abaixo de cada eixo i

\mathbf{I} = vetor de ordenadas da linha de influência em todos k instantes

σ_j = tensão normal na viga j

M_j = momento fletor na viga j

ϵ_j = deformação longitudinal em cada viga

s_i = distância entre eixos do caminhão

L_i = distância entre o eixo i e o primeiro eixo

C_i = número de leituras correspondente à distância L_i

k = número da leitura de deformação em um instante qualquer

K = número total de leituras

f = frequência das leituras (Hz)

v = velocidade de passagem do caminhão

φ = função erro

\mathbf{A} = matriz esparsa e simétrica que depende apenas dos pesos dos eixos

\mathbf{M} = vetor (algoritmo 1) / matriz (algoritmo 2), que depende de pesos dos eixos e medidas de deformação

L_{FAD} = distância entre dois sensores FAD

t_i = instantes de pico dos sensores FAD

$\boldsymbol{\epsilon}$ = vetor de deformações

índice t = prevista ou teórica

índice m = medida

Q = coeficientes de distribuição transversal – método experimental

\mathbf{Q} = vetor de coeficientes de distribuição transversal

\mathbf{EW} = vetor de coeficientes EW_i

$\mathbf{I}\mathbf{L}$ = matriz de ordenadas de linha de influência abaixo de cada eixo

\mathbf{I}^{Ci} = matriz com ordenadas da linha de influência em cada eixo para cada viga

\mathbf{L} = vetor resultante da multiplicação dos vetores $\boldsymbol{\epsilon}$ e \mathbf{EW}

\mathbf{F} = matriz com os coeficientes f_{ij} resultantes de: $f_{ij} = \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{I}^{CiT} \cdot \mathbf{I}^{Ci} \cdot \mathbf{Q}$

\mathbf{m} = vetor com os coeficientes m_{ij} resultantes de: $m_i = \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{I}^{CiT} \cdot \mathbf{L}$

SUMÁRIO

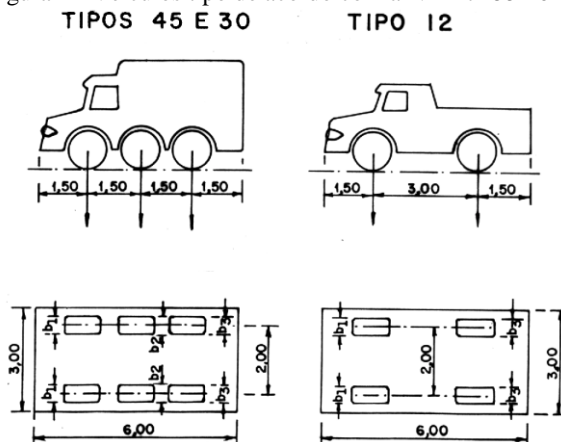
1. INTRODUÇÃO	25
1.1. JUSTIFICATIVA.....	28
1.2. OBJETIVOS.....	28
1.2.1. Objetivo Geral	28
1.2.2. Objetivos Específicos	29
1.3. Resumo do método de desenvolvimento do trabalho	29
1.4. Organização dos capítulos	30
2. ANÁLISE DO CARREGAMENTO EM PONTES	31
2.1. Dados gerais sobre cargas rodoviárias e pontes brasileiras ..	31
2.2. Carga móvel e linhas de influência teóricas em pontes	33
2.3. Distribuição transversal dos esforços	34
2.3.1. Método de Engesser-Courbon	36
2.3.2. Método de Leonhardt	38
2.3.3. Processo de Fauchart	39
2.3.4. O método da AASHTO	40
2.3.5. Estudos sobre distribuição transversal	41
3. SISTEMAS DE PESAGEM EM MOVIMENTO	47
3.1. Sistemas de pesagem em movimento em pontes	50
3.1.1. A evolução dos sistemas BWIM	52
3.1.2. Algoritmo de Moses	55
3.1.3. Obtenção da linha de influência real	61
3.1.4. Obtenção da velocidade e espaçamento entre eixos	68
3.1.5. Obtenção dos pesos dos eixos	69
3.1.6. Características de pontes ideais para sistemas BWIM e NOR BWIM	71

3.2.	Obtenção de linhas de influência reais com o sistema B-WIM	75
3.3.	Estudos envolvendo distribuição transversal de esforços.....	80
3.4.	Conclusões	87
4.	METODOLOGIA.....	91
4.1.	Descrição da ponte em estudo: Ponte Lambari	91
4.2.	Eventos de calibração.....	95
4.3.	Desenvolvimento dos algoritmos	102
4.3.1.	Algoritmo 1: Algoritmo de Moses.....	102
4.3.2.	Algoritmo 2: Consideração da distribuição transversal	103
4.4.	Suavização das linhas de influência	105
5.	RESULTADOS	109
5.1.	Análise das Linhas de Influência.....	109
5.2.	Pesagem dos veículos.....	111
5.3.	Avaliação das LIs após filtragem	116
5.4.	Distribuição transversal dos esforços	120
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
6.1.	Conclusões	129
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros:	132
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
	APÊNDICE A.....	137
1.	Primeiro algoritmo: Algoritmo de Moses.....	137
2.	Segundo algoritmo: Considerando a distribuição transversal dos esforços.....	142

1. INTRODUÇÃO

As pontes de vias principais rurais e urbanas são projetadas no Brasil utilizando principalmente os trens-tipos das classes 30 e 45 presentes na norma “NBR 7188 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas”, cuja versão em vigor é a de 2013. Estes trens-tipos, apresentados na figura a seguir, consistem de uma carga de multidão acrescida de um veículo padrão com 6 rodas, com mesmo carregamento em cada uma, em 3 eixos com igual espaçamento de 1,5 m. Tais veículos vêm sendo usados desde a NB-6 de 1960, apresentando, desde então, variação na carga total usada, porém sem modificações na geometria.

Figura 1 - Veículos tipo de acordo com a NBR 7188-2013.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Estes veículos de 3 eixos já não representam a realidade do tráfego em muitas rodovias brasileiras. O transporte de mercadorias em geral, principalmente o escoamento da produção agrícola, que supera recordes a cada ano, é feito por rodovias. Os caminhões usados podem ter comprimentos superiores a 30 metros com até 9 eixos, sendo bem diferentes do veículo utilizado nos projetos. Segundo um levantamento publicado por Mendes (2009), cerca de 70% das pontes registradas no DNIT possuem idade superior a 30 anos e foram projetadas com o trem tipo da norma NBR 7188, diferente dos caminhões que cruzam as pontes usualmente, que muitas vezes tem carga superior ao permitido

por lei. Além disso, em breve atingirão a vida útil para qual foram projetadas (50 anos).

Figura 2 - veículos comuns nas rodovias brasileiras



Neste cenário passa a ficar evidente a necessidade de uma melhor caracterização do tráfego rodoviário existente, para que se possa verificar qual o carregamento que está sendo efetivamente aplicado. Desta forma é possível certificar-se de que as estruturas das pontes estão sendo projetadas adequadamente, ou mesmo se o pavimento ao longo da estrada está sendo corretamente dimensionado. A avaliação do tráfego permite conhecer o excesso de carga submetido às pontes que, aliado à usual falta de manutenção, são responsáveis pela deterioração das estruturas. Nota-se, então, a necessidade de verificar o comprometimento estrutural das pontes brasileiras.

O controle dos pesos dos caminhões é de responsabilidade das concessionárias das rodovias ou, no caso de rodovias não concessionadas, é feito pelo próprio DNIT junto aos postos da Polícia Rodoviária Federal. A pesagem é feita em balanças estáticas, sobre as quais os veículos devem parar completamente. Dessa forma, nem todos os veículos que trafegam são pesados. Para superar essas limitações foi desenvolvido um método de pesagem de veículos, com sistemas de pesagem em movimento (weigh in motion - WIM). Neste processo os veículos são pesados na velocidade real do tráfego, usando vários tipos de sensores sobre a rodovia. Este sistema, já bastante usado na Europa, tem limitações tais como menor precisão em relação à pesagem estática e o fato de o equipamento estar sujeito a desgaste constante, por estar instalado sobre o pavimento, além de ser visível ao motorista. (QUILLIGAN, 2003).

Outras maneiras de pesagem de veículos em movimento foram estudadas com o intuito de ter maior controle de cargas e caracterização do tráfego local. No fim dos anos 70 surge o sistema de pesagem em movimento em pontes (bridge weigh in motion – BWIM). Este sistema baseia-se em medidas de deformação na ponte com a passagem de um

veículo. Essas medidas possibilitam a estimativa de dados do tráfego passante. Sensores de deformação são instalados embaixo da ponte (ou viaduto), invisíveis aos motoristas, e detectam sinais de deformação desde o instante em que a primeira roda do veículo encontra-se sobre a ponte até a última roda sair desta. Assim, podem-se determinar os pesos dos eixos e a distância entre estes. (QUILLIGAN, 2003).

O conceito de BWIM foi introduzido por Moses utilizando um algoritmo que recebeu seu nome. O algoritmo faz uso do conceito de linha de influência para obter o peso dos veículos que passam sobre a ponte. Por meio deste algoritmo, a partir dos dados de deformação obtidos pelos sensores, da distância entre eixos calculada e das ordenadas da linha de influência adotada para a ponte em questão, pode-se obter o peso de cada eixo do veículo. O uso de linhas de influência obtidas por análise estrutural, no entanto, leva a resultados geralmente não correspondentes às medidas de peso obtidas em campo por balanças estáticas. Os resultados são melhores quando se obtém a linha de influência a partir de medidas diretas dos efeitos da carga de um veículo conhecido. (OBRIEN; QUILLIGAN; KAROUMI, 2006).

Figura 3 - Pontes com a instalação do sistema BWIM – (a) Ponte em laje (b) Ponte com várias longarinas



Há vários métodos para obter a linha de influência real de uma ponte. Muitos estudos indicam algumas possíveis alterações no algoritmo de Moses para aumentar a precisão dos resultados (ZHAO; UDDIN, 2010; GONZÁLEZ et al, 2012; ZHAO et al, 2014; IENG et al, 2015), outros estudam a melhor forma de reduzir o ruído do sinal de deformação (OBRIEN; GONZÁLEZ; DOWLING (2010)), alguns usam algoritmos 2D (QUILLIGAN, 2003), dentre várias outras soluções. Quanto mais próxima à real for a linha de influência usada para o sistema, mais precisos serão os resultados da pesagem dos veículos. Além disso, a partir dessa linha de influência real podem-se obter os

momentos atuantes reais na estrutura em estudo, permitindo uma melhor verificação da sua segurança.

Na maior parte desses métodos, porém, obtém-se uma linha de influência para toda a estrutura, considerando que todas as vigas tenham o mesmo comportamento, o que nem sempre é verdade. Entretanto, é possível definir a parcela de carregamento absorvida por cada longarina, e assim obter linhas de influência diferentes e a partir destas avaliar o comportamento estrutural e segurança de cada viga individualmente.

As diferenças entre as linhas de influência obtidas por métodos de análise estrutural e pelos métodos diretos e a diferença nos resultados finais de pesagem serão discutidas no presente trabalho, bem como a proposta da consideração que a linha de influência de cada viga dependa da distribuição transversal do carregamento.

1.1. Justificativa

Há vários estudos sobre a obtenção das linhas de influência reais das pontes. Poucas vezes, porém, é considerado o comportamento bidimensional da ponte, no qual há uma diferente distribuição transversal das cargas das rodas para cada viga. A consideração de uma só linha de influência para todo o sistema nem sempre é correta, principalmente quando as vigas têm geometrias diferentes e um diferente estado de degradação. Surge então a necessidade de avaliar essa transversalidade das cargas e a possibilidade de obter linhas de influência diferentes em cada viga, bem como avaliar a relevância desta consideração nos resultados do sistema BWIM. Assim, pode-se avaliar o comportamento real de cada viga e usar esses dados para avaliação da segurança da estrutura.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliação do efeito da transversalidade das cargas móveis sobre as vigas das pontes na obtenção de linhas de influência reais a partir de métodos de pesagem em movimento em pontes.

1.2.2. Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Implementar dois algoritmos BWIM, um considerando a ponte como um todo e outro considerando a distribuição transversal do carregamento para cada viga separadamente;
- Obter linhas de influência diferentes para cada viga e avaliar a relevância na precisão dos resultados BWIM em relação ao uso de uma só linha de influência para o sistema;
- Comparar as linhas de influência obtidas por análise estrutural às obtidas pelos algoritmos BWIM implementados considerando também o comportamento bidimensional;
- Avaliar os pesos dos eixos e o peso total dos caminhões obtidos por este sistema;
- Filtrar os sinais de deformação e estudar os efeitos desta filtragem na obtenção das linhas de influência, pesos e transversalidade da carga.
- Estudar a obtenção de coeficientes de distribuição transversal das cargas das rodas a partir de dados do tráfego e comparar a métodos simplificados de obtenção deste fator;

1.3. Resumo do método de desenvolvimento do trabalho

Efetua-se primeiramente uma revisão da literatura abordando o carregamento usado para projeto de pontes de acordo com as normativas brasileiras, bem como o carregamento permitido por lei, as linhas de influência em pontes e a distribuição transversal dos esforços. A seguir, são discutidos o sistema de pesagem em movimento em pontes, apresentando os algoritmos para obtenção das linhas de influência e pesos dos eixos e alguns trabalhos no qual o tema foi estudado.

Dois algoritmos foram implementados no programa MatLab. Um deles considera apenas uma linha de influência para toda a ponte e o outro considera a distribuição transversal dos esforços, utilizando coeficientes de distribuição obtidos a partir de medidas de deformação de cada viga, que indicam a parcela do carregamento absorvida por cada uma. Dessa forma são obtidas, neste segundo algoritmo, linhas de influência diferentes para cada longarina.

As pontes analisadas foram instrumentadas com extensômetros para obtenção do sinal de deformação e foi feita uma etapa de calibração com veículos conhecidos.

A partir dos sinais de deformação obtidos e de dados referentes à geometria das pontes podem-se obter como resultados as linhas de influência, os pesos nos eixos e os erros em relação a pesagens estáticas. Os resultados são então avaliados e discutidos.

1.4. Organização dos capítulos

Ao longo deste capítulo foi apresentada a proposta do presente estudo incluindo a motivação, o objetivo e a metodologia.

No **capítulo 2** aborda-se brevemente o tema da análise estrutural de pontes, incluindo dados sobre as rodovias brasileiras, as linhas de influência e a distribuição das cargas.

No **capítulo 3** são apresentados os conceitos básicos e fundamentais sobre o sistema de pesagem em movimento em pontes necessários para o entendimento e o desenvolvimento do trabalho. O fim deste capítulo destina-se à apresentação de uma revisão de literatura sobre a obtenção de linhas de influência reais a partir do método BWIM.

No **capítulo 4** são apresentadas a ponte estudada, os sinais de deformação obtidos e os algoritmos implementados.

No **capítulo 5** são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos para as linhas de influência e pesos, comparando o uso dos dois algoritmos. Neste capítulo ainda são discutidos os efeitos da filtragem do sinal de deformação.

Finalmente, o **capítulo 6** traz as considerações finais a respeito da pesquisa e apresenta sugestões de trabalhos futuros.

2. ANÁLISE DO CARREGAMENTO EM PONTES

2.1. Dados gerais sobre cargas rodoviárias e pontes brasileiras

As pontes são projetadas no Brasil utilizando o trem-tipo da norma “NBR 7188 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas”, cuja versão em vigor é a de 2013. Este trem-tipo consiste de uma carga de multidão acrescida de um veículo padrão. Estes veículos podem ser de três tipos distintos, com as características apresentadas na Figura 1. A área sob o veículo é supostamente retangular, de 3 m de largura e 6 m de comprimento. A disposição das rodas para as 3 classes de veículo tipo pode ser vista nesta mesma figura. A classe 45 inclui veículos cujo peso total é de 450 kN. As classes 30 e 12, de mesma forma, correspondem a veículos com peso total de 300 kN e 120 kN respectivamente. As cargas distribuídas por área e a carga em cada roda estão disponíveis na norma em questão.

A geometria desses veículos tipos foi definida na NB-6 de 1960 que esteve em vigor por mais de 20 anos. As classes eram inicialmente de 360, 240 e 120 kN. Em 1984 foi publicada a NBR 7188 na qual os trens-tipo de 240 e 360 kN foram substituídos por 300 e 450 kN, mantida a distribuição dos eixos. A norma NBR 7188 de 2013 trouxe modificações sobre o coeficiente de impacto, dentre outras, mas não houve novas alterações nas dimensões dos veículos e na carga usada. Mesmo após a mudança no carregamento, estes veículos tipo continuam a não refletir a realidade do tráfego rodoviário nacional. (LUCHI, 2006 e SILVA, 2013).

Sobre as pontes e viadutos presentes em toda malha rodoviária brasileira trafegam cerca de 2,9 milhões de veículos comerciais, compreendendo caminhões, carretas, combinações de veículos e ônibus. (LUCHI, 2006).

De acordo com o código de trânsito brasileiro (Lei Nº 9.503, 1997) há limitações na área do transporte de cargas e no artigo 99 é dito que:

“Art. 99. Somente poderá transitar pelas rodovias terrestres o veículo cujo peso e dimensões atenderem aos limites estabelecidos pelo CONTRAN.

§1º O excesso de peso será aferido por pesagem ou por verificação do documento fiscal, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

§ 2º Será tolerado um percentual sobre os limites do peso bruto total (PBT) e peso bruto transmitido por eixos de veículos à superfície das vias, quando aferido por equipamento, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

De acordo com o CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito –, a largura máxima permitida para os veículos é de 2,60 m, o comprimento máximo pode ser de 14 m para veículos simples e até 19,80 m para veículos com reboque. Os pesos estão resumidos na Tabela 1, que não se aplica a combinações de veículos de carga (CVCs), que seguem as resoluções 68/98 e 184/05 do CONTRAN.

Tabela 1 - Limites de cargas

Situação	Carga*
Peso bruto total (PBT)	450 kN
Eixo simples isolado com rodado duplo	100 kN
Eixo simples isolado com rodado simples	60 kN
Eixo tandem duplo	170 kN
Eixo tandem triplo	255 kN

*permitida tolerância de 5% devido à falta de precisão das balanças

Fonte: CONTRAN

O peso dos veículos comerciais é verificado nas balanças estáticas sobre as quais os caminhões devem parar completamente.

Esses dados, porém, não condizem com o que foi usado para o projeto da maioria das pontes brasileiras, grande parte construída na década de 60, obedecendo os trens-tipo da NB-6. As alterações nas cargas rodoviárias permitidas e nas classes dos veículos tipo usados em projeto, aliadas à ausência de manutenção são motivos para o surgimento de danos nas estruturas, comprometendo a segurança dos usuários. Dados divulgados pelo Tribunal de Contas da União (TCU) indicam que cerca de 75% das pontes existentes nas rodovias brasileiras precisam passar por algum processo de intervenção, como recuperação, reforço ou alargamento de suas estruturas. (SILVA, 2013).

Um levantamento publicado por Mendes (2009) sobre 5600 pontes cadastradas nas rodovias pelo DNIT indica, dentre outras informações, que:

- 70% das pontes possui idade superior a 30 anos;
- 94% das pontes possuem sistema estrutural em viga de concreto armado ou protendido;

- 90% das pontes foram projetadas com trem tipo de 240,0 kN ou de 360,0 kN;
- 63% das pontes têm extensão inferior a 50,0 m;
- 50% das pontes possuem apenas um vão com dois balanços;
- 93% das pontes possuem vão máximo inferior a 40,0 m.

Analisando esses dados conclui-se que, devido a sua idade, grande parte das pontes pode apresentar certo grau de degradação, o que prejudicaria sua resistência. Considerando que houve mudança no carregamento do trem-tipo da norma, desde 1982, pois os veículos passantes já apresentavam carga superior, acredita-se que com o carregamento atual, ainda mais intenso, haja a possibilidade de certas estruturas tornarem-se inseguras. Surge, então, a necessidade de verificar essas pontes quanto à resistência aos novos carregamentos.

2.2. Carga móvel e linhas de influência teóricas em pontes

O projeto de pontes inclui, além de peso próprio, carregamentos permanentes e acidentais tais como vento ou efeitos térmicos e a consideração de uma carga móvel conforme NBR 7188.

Carga móvel é uma força de direção, sentido e intensidade determinadas, mas sem posição fixa na estrutura. Um comboio de cargas móveis corresponde a um conjunto de cargas móveis que mantêm entre si uma posição relativa constante, tal como em veículos. A região da estrutura onde se considera a atuação de cargas móveis é designada por caminho de rolamento. No caso de peças lineares este caminho de rolamento é uma linha, enquanto em peças bidimensionais pode corresponder a uma superfície. (PEREIRA, 1994).

A cada posição da carga móvel há um determinado campo de esforços, reações e deslocamentos. Para uma dada grandeza em estudo é necessário, então, determinar qual a posição mais desfavorável da carga móvel. (PEREIRA, 1994). Desenvolve-se assim o conceito de linhas de influência para cada esforço.

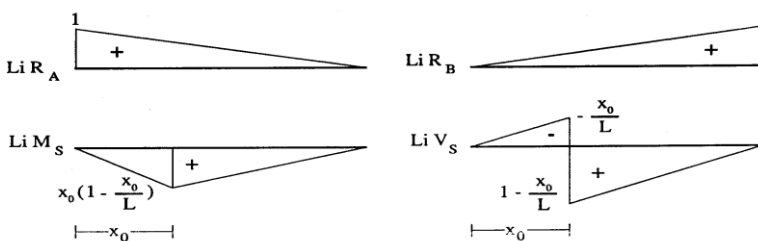
Como definido por Sussekind (1973):

“Linha de influência de um efeito elástico E em uma dada seção S é a apresentação gráfica ou analítica do valor deste efeito, naquela seção S, produzido por uma carga unitária, de cima pra baixo, que percorre a estrutura.”.

Para obtenção da linha de influência, a estrutura é resolvida considerando como ação a carga móvel unitária colocada numa posição genérica sobre o caminho de rolamento. Em estruturas isostáticas, a resolução para dada seção é feita usando somente as equações de equilíbrio. No caso das estruturas hiperestáticas é necessário recorrer a métodos de análise de estruturas, como o Método das Forças ou o Método dos Deslocamentos.

A Figura 4 mostra exemplos de linhas de influência (LI) para vários esforços em uma viga isostática simplesmente apoiada. As primeiras são as LI das reações de apoio em A e B (nos apoios da viga) e em seguida a linha de influência do momento fletor para uma seção S e do esforço cortante nessa mesma seção.

Figura 4 - Linhas de influência das reações de apoio, momento fletor e esforço cortante numa seção S de uma viga biapoiada.



Fonte: Pereira (1994).

Com base no traçados de LI 's e conhecidos os esforços causados pelas cargas fixas, é possível obter as envoltórias limites de esforços necessárias para o dimensionamento de estruturas submetidas a cargas móveis ou acidentais.

Cabe ressaltar que a vinculação dos apoios altera a linha de influência da estrutura. Vigas simplesmente apoiadas resultam esforços maiores que em estruturas engastadas. A LI real da estrutura é mais próxima de uma situação intermediária entre o apoio e o engaste, semelhante ao que pode ser obtido teoricamente com apoios elásticos.

2.3. Distribuição transversal dos esforços

Os tabuleiros de pontes formados por laje apoiada em várias longarinas e transversinas formam uma grelha altamente hiperestática cuja solução geralmente requer métodos numéricos. Existem, no entanto, métodos simplificados que permitem uma análise manual

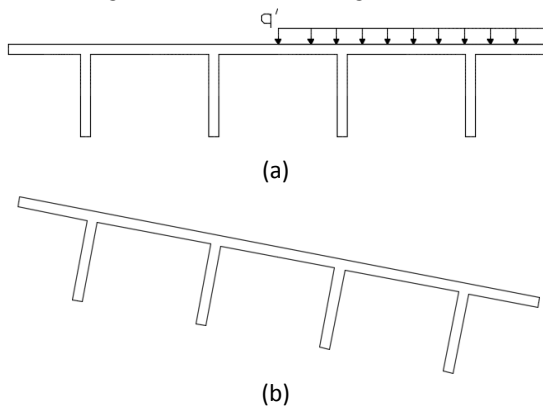
rápida, para fins de anteprojeto ou para verificar os resultados de um programa de cálculo.

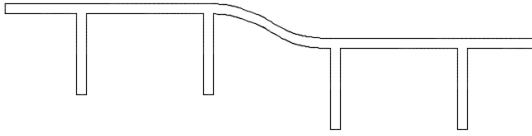
A distribuição transversal de cargas em tabuleiros de vigas múltiplas tem a finalidade de determinar a parcela da carga acidental total sobre a laje que solicita cada viga da seção transversal. (ALVES, ALMEIDA e JUDICE, 2004).

Dois dos métodos simplificados tradicionais para calcular a distribuição transversal da carga das rodas são o método do diafragma rígido e a regra da alavanca (*lever-rule*), este último inserido na norma norte-americana. (AASHTO, 2002). O método do diafragma rígido, também conhecido como método de Engesser-Courbon, considera o carregamento distribuído linearmente para cada viga usando movimentos de rotação e translação de corpo rígido. No método da regra da alavanca o peso das rodas é distribuído apenas para as duas vigas adjacentes. Estes métodos representam condições extremas de rigidez relativa entre laje e vigas. (LI; CHEN, 2011).

A Figura 5 exemplifica o comportamento desses dois métodos. Ao considerar a rigidez transversal como infinita, a seção carregada excêntrica gira como um todo, transmitindo esforços em toda superestrutura, conforme ilustrado na Figura 5(b). Quando avaliado o caso oposto, considerando rigidez transversal nula, a parte carregada se desloca e a parte não carregada permanece no lugar, como mostra a Figura 5(c).

Figura 5 - Comportamentos da laje com carregamento excêntrico. (b) Com rigidez infinita (c) Com rigidez nula





(c)

Fonte: Almeida, 2015

Além destes métodos, destacam-se ainda o “Método de Leonhardt”, o processo de Fauchart, “Método dos coeficientes de distribuição transversal de Guyon-Massonet”, “Método de Homberg”, o método da AASHTO, dentre outros. Uma maneira mais refinada de estudar essa distribuição transversal dos esforços é usando programas computacionais com o Método dos Elementos Finitos.

Os itens seguintes explicam mais detalhadamente alguns dos métodos citados.

2.3.1. Método de Engesser-Courbon

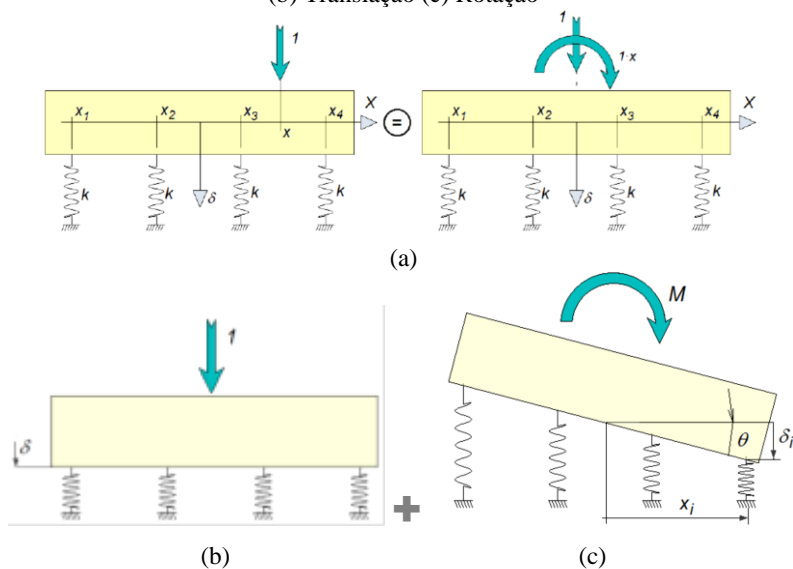
Em 1940, Courbon desenvolveu o método dos coeficientes de distribuição transversal para grelhas constituídas por transversinas com rigidez infinita. Este método também é atribuído a Engesser, sendo conhecido como "Método de Engesser-Courbon" (ALVEZ; ALMEIDA; JUDICE, 2004).

O método de Courbon tem como premissas as hipóteses básicas da Teoria das estruturas como comportamento linear elástico, pequenos deslocamentos, Princípio de Saint Venant, e considera ainda que as longarinas, todas com mesma rigidez, são paralelas e ligadas perpendicularmente a uma transversina de rigidez infinita. Neste método desprezam-se os efeitos de torção das vigas. (ALVEZ, ALMEIDA, JUDICE, 2004).

Para a determinação da distribuição transversal, considera-se uma carga unitária numa posição genérica. A ação da carga nesta posição pode ser considerada como a superposição de uma carga centrada e um momento, conforme Figura 6(a). A carga unitária centrada ocasiona uma translação de corpo rígido, função da quantidade e rigidez das molas, como mostra a Figura 6(b) e a Equação (2.1). A ação do momento gera uma rotação de corpo rígido, conforme mostra a Figura 6(c), com o deslocamento causado conforme a Equação (2.2).

Figura 6 - Deformação de corpo rígido devido à aplicação de carga excêntrica.

(b) Translação (c) Rotação



Fonte: Almeida (2015)

$$\delta_{\text{translação}} = \frac{1}{nk} \quad (2.1)$$

$$\delta_{\text{rotação}} = \theta \cdot x_i \quad (2.2)$$

Onde: n é o número de longarinas; k é a rigidez das longarinas; x_i é a distância do centro da ponte até a viga em análise; θ é o ângulo de rotação.

Com a reação de apoio causada pela deformação de uma mola $R = \delta \cdot k$, chega-se às reações de apoio devido à carga unitária situada a uma excentricidade “ e ” do centro da seção transversal da ponte.

$$R_{\text{translação}} = \frac{1}{n} \quad (2.3)$$

$$R_{\text{rotação}} = \frac{e \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.4)$$

$$R_i = \frac{1}{n} + \frac{e \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.5)$$

No caso de uma carga unitária, o valor da reação na *i*ésima viga R_i é equivalente ao coeficiente de distribuição transversal da carga para cada viga.

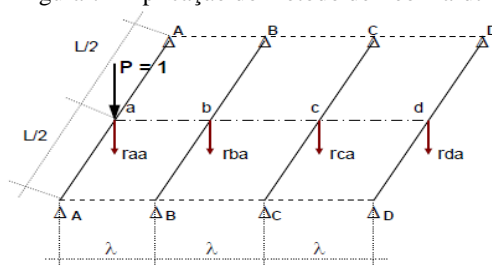
2.3.2. Método de Leonhardt

No método de Leonhardt considera-se, além das hipóteses da teoria de estruturas, que todas as transversinas são representadas por uma única transversina fictícia simplesmente apoiada no meio dos vãos das longarinas. Neste método é estudado o efeito de grelha e são desprezados os efeitos de torção das longarinas.

A Figura 7 auxilia a compreensão do método. Nela r_{aa} é a parcela da carga P (posicionada sobre a longarina A) que solicita a longarina A, r_{ba} é a parcela da carga P que solicita a longarina B, r_{ca} é a parcela da carga P que solicita a longarina C e r_{da} é a parcela da carga P que solicita a longarina D. Considerando carga unitária obtém-se os coeficientes de distribuição transversal r_{ij} , onde i representa a longarina analisada e j o ponto de aplicação da carga. Lembrando que $r_{ij} = r_{ji}$. No caso:

$$r_{aa} + r_{ba} + r_{ca} + r_{da} = 1 \quad (2.6)$$

Figura 7 - Aplicação do método de Leonhardt



Fonte: Antonio Neto, 2003

Os coeficientes r_{ij} nada mais são do que as ordenadas da linha de influência para distribuição transversal, para a longarina i , quando é aplicado um carregamento ao longo da transversina.

A determinação dos coeficientes de distribuição transversal de carga depende do número e posição das transversinas. Leonhardt desenvolveu uma série de tabelas de acordo com o número de longarinas da ponte. As tabelas, que podem ser encontradas em San Martín (1981),

trazem os coeficientes de distribuição transversal em função de um chamado coeficiente de rigidez ζ dado por:

$$\zeta = \frac{I_T}{I_L} \left(\frac{L}{2S} \right)^3 \quad (2.7)$$

Onde: I_T é a inércia das transversinas
 I_L é a inércia das longarinas;
 L é o vão das longarinas;
 S é o espaçamento entre longarinas.

Este coeficiente pode ser ajustado de acordo com o número de transversinas e caso as longarinas tenham inércia variável.

Nas tabelas de Leonhardt há um conjunto de valores r_{ij} para cada coeficiente de rigidez ζ . Com estes valores podem-se traçar diagramas para carga posicionada sobre a viga 1, depois sobre a viga 2, até a última viga, todos com a largura da seção transversal da ponte e valores de r_{ij} nas posições das longarinas, gerando linhas de influência de distribuição transversal. Em cada um destes diagramas a carga móvel é posicionada e mede-se o valor abaixo da carga. A parcela da carga recebida por cada viga é esta medida.

2.3.3. Processo de Fauchart

O processo de Fauchart é aplicado em tabuleiros de múltiplas vigas sem transversinas intermediarias. As longarinas devem estar biapoiadas e possuir inércia constante. Neste processo o trabalho longitudinal das lajes não é considerado (STUCCHI, 2006).

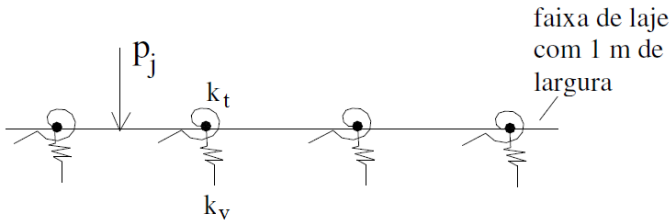
Fauchart propõe o cálculo de uma estrutura plana que representa um metro de largura da seção transversal da laje. As vigas são substituídas por molas que impõem resistência ao deslocamento vertical e à rotação. A constante das molas é obtida a partir da aplicação da teoria de Euler-Bernoulli para vigas e sua resolução a partir de séries de Fourier sendo dadas por:

$$k_v = \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 EI_L \quad e \quad k_t = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 GJ \quad (2.8)$$

Onde: L é o comprimento do vão;
 I_L é a inércia da seção;

J é a inércia polar da seção;
 E é o módulo de elasticidade secante;
 G é o módulo de elasticidade transversal;
 k_v é o coeficiente de mola vertical;
 k_t é o coeficiente de mola transversal

Figura 8 - Esquema estrutural transversal para uma faixa unitária



Fonte: Adaptado de Stucchi, 2006

Para obter as linhas de influência que definem as cargas nas vigas, bem como as sollicitações mais importantes na laje de ligação, resolve-se a viga sobre apoios elásticos, como mostra a Figura 8, para uma série de posições de uma carga unitária. (STUCCHI, 2006).

Se for desprezada a torção uniforme ($J=0$) e admitida infinita a rigidez da laje de ligação (simulando transversina rígida) o processo do Fauchart se reduz ao de Courbon. (STUCCHI, 2006).

2.3.4. O método da AASHTO

Os fatores de distribuição do carregamento apresentados nas especificações atuais da AASHTO LRFD – Load Resistance Factor Design (2002) foram obtidos por análise linear elástica com elementos finitos de centenas de pontes de um banco de dados americano (National Bridge Inventory File – NBIF). As informações desse banco de dados incluem tipo de ponte, número de vigas, vão, largura total, altura, área e momento de inércia das vigas, espessura da laje, ano de construção, dentre outras informações. Modelos analíticos foram desenvolvidos para cada ponte (ZOKAIE, 2000).

De acordo com Zokaie (2000), os parâmetros considerados importantes para a distribuição do carregamento da carga móvel para momento fletor e força cortante obtidos a partir de um estudo de sensibilidade são:

S = espaçamento entre longarinas;

L = vão da longarina;
 t = espessura da laje;
 $K_g = I_L + Ae_g^2$ = rigidez da longarina;
 I_L = inércia das longarinas;
 A = área da seção transversal da longarina;
 e_g - distância do centro geométrico da viga ao centro da laje
 n = número de vigas;
 d_e = distância do caminhão à borda da ponte
 w = distância entre a primeira viga interna e a borda da ponte

Nas expressões propostas considera-se que os efeitos de cada parâmetro são independentes e descritos por uma função exponencial.

A seguinte expressão é proposta para o coeficiente de distribuição transversal do momento fletor de vigas internas, quando há apenas uma via carregada:

$$g_{\text{int}} = 0,06 + \left(\frac{S}{4300}\right)^{0,4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0,3} \left(\frac{K_g}{L \cdot t^3}\right)^{0,1} \quad (\text{valores em mm}) \quad (2.9)$$

Quando há mais de uma via carregada a expressão se modifica para:

$$g_{\text{int}} = 0,075 + \left(\frac{S}{2900}\right)^{0,6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0,2} \left(\frac{K_g}{L \cdot t^3}\right)^{0,1} \quad (\text{valores em mm}) \quad (2.10)$$

Para vigas externas o fator de distribuição é determinado por:

$$g_{\text{ext}} = \frac{w - d_e}{S} \quad (2.11)$$

Diferentes expressões são propostas para o coeficiente de distribuição transversal do esforço cortante.

Na AASHTO há um intervalo de aplicação para cada uma das expressões apresentadas. Caso haja presença de mais veículos na mesma via há um fator de correção.

2.3.5. Estudos sobre distribuição transversal

Há uma série de estudos sobre a distribuição das cargas nas pontes. A maior parte deles compara os resultados obtidos por algum

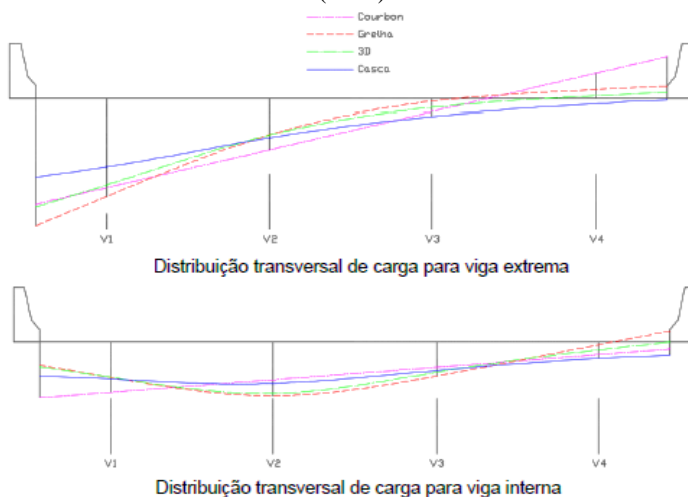
dos métodos descritos com resultados obtidos pelo método de elementos finitos. Então é avaliado, por exemplo, qual dos métodos analíticos resulta em fatores de distribuição transversal mais próximos aos obtidos pela modelagem computacional, considerada como a mais próxima ao comportamento real da ponte.

Almeida (2015) estudou 4 métodos de distribuição transversal das cargas em pontes de 4 vigas: o método de Courbon e outros 3 métodos computacionais com modelo de grelha, pórtico 3D e casca. O método de Courbon apresentou as maiores solicitações, sendo, portanto, a favor da segurança, apresentando sempre os maiores fatores de distribuição da carga para a viga externa, independente da posição da carga. No método de grelha ao carregar a primeira viga com carga distribuída unitária esta foi muito mais solicitada que as outras vigas. Ao carregar a segunda viga os fatores de distribuição da carga foram bem diferentes, pois a segunda viga absorveu muito mais carga que as demais. Este mesmo comportamento de acordo com a posição da carga também ocorreu para os métodos do pórtico 3D e para o modelo de casca. Os valores dos coeficientes estão na Tabela 2 e a Figura 9 compara os valores obtidos em todos os modelos. No método de casca a rigidez é maior que nos demais métodos, podendo-se observar maior redistribuição dos esforços. Os autores concluíram que este método, que apresentou menores esforços, era o que mais se aproximava da realidade.

Tabela 2 - Fatores de distribuição de cada viga para cada modelo de acordo com Almeida (2015)

Método	Posição do carregamento	V1	V2	V3	V4
Courbon	1ª viga	0,700	0,400	0,100	-0,200
	2ª viga	0,400	0,300	0,200	0,100
Grelha	1ª viga	0,769	0,281	0,021	-0,071
	2ª viga	0,281	0,427	0,271	0,021
Pórtico 3D	1ª viga	0,678	0,283	0,068	-0,021
	2ª viga	0,283	0,409	0,220	0,068
Casca	1ª viga	0,535	0,294	0,131	0,040
	2ª viga	0,305	0,332	0,226	0,137

Figura 9 - Comparação entre os fatores dos modelos de acordo com Almeida (2015)



Em 2000, Tokaie, Z. apresentou o estudo que deu origem às alterações nos coeficientes de distribuição transversal da AASHTO LRFD Bridge Design Specifications de 1994. Notou-se que as fórmulas da AASHTO estavam gerando resultados válidos para pontes com uma geometria típica (para espaçamentos S pouco menores que 2 metros e vãos L em torno de 18 m), mas perdiam precisão quando os resultados eram variados (usando vãos relativamente longos ou bem pequenos). Um estudo foi feito sobre uma base de dados de centenas de pontes de todos os tipos (vigas T, protendidas, vigas de aço, dentre outras) e para cada ponte foi feito um modelo de elementos finitos. O caminhão carregado era posicionado longitudinalmente no local em que produz o maior momento fletor. Em seguida, os caminhões eram movidos transversalmente por toda largura da ponte e para cada posição o momento fletor máximo nas vigas era calculado. As características da ponte foram variadas e comparadas entre si por meio de gráficos. A partir desses gráficos pode ser feita uma análise de sensibilidade para cada variável, descobrindo qual teria maior influência sobre a distribuição transversal das cargas. Após esta análise foram determinados os parâmetros chave que são: espaçamento entre vigas (S), comprimento do vão (L), rigidez das pontes (K_g) e espessura da laje (t_s). O espaçamento transversal entre os eixos dos caminhões não foi considerado, já que para fins de norma esse tamanho é fixo. Usando os

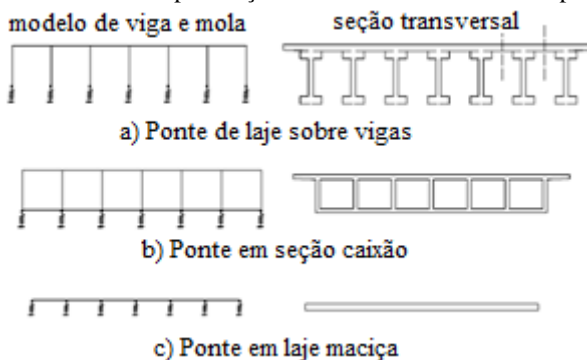
modelos, a partir destes quatro parâmetros, fórmulas exponenciais para o fator de distribuição transversal para cada tipo de ponte foram desenvolvidas empiricamente, e ajustadas com constantes quando necessário, considerando o viés ou curvas da ponte, resultando nas fórmulas tabeladas da AASHTO LRFD.

Razaqpur, Shedid e Nofal (2012) estudaram a distribuição inelástica do carregamento em pontes com vigas de aço e laje em concreto, comparando com a distribuição a partir de análise elástica linear das expressões da AASHTO. Foram analisados 50 casos cobrindo todos os parâmetros considerados relevantes como comprimento e largura da ponte, número de vigas e espaçamento entre elas. Esses casos incluem 36 pontes com geometrias e propriedades diferentes e 14 casos de carregamento. Ao fim do estudo, Razaqpur, Shedid e Nofal (2012) constataram que os fatores de distribuição transversal obtidos pela AASHTO foram bem maiores que os por eles obtidos e que o nível de conservadorismo variou significativamente do estado elástico para o último. O estudo concluiu ainda que nenhum fator de ajuste deve ser aplicado aos fatores de distribuição da carga para torna-los adequados ao estado limite último, já que estes fatores são governados pela geometria, propriedades e carregamento da ponte.

Ainda pode-se citar o estudo feito em 2011 por Li e Chen, que afirmam que para determinadas posições transversais do caminhão, tanto a regra da alavanca usada na norma americana, quanto o método do diafragma rígido podem superestimar ou subestimar os esforços nas vigas. Foi proposto, então, um método de vigas apoiadas em molas (*BESM – beam-on-elastic-spring-suports model*) que representasse a ponte e resultasse nos fatores de distribuição da carga. O processo para obtenção desses fatores é o seguinte:

- 1) Construir um modelo com elemento linear para uma das vigas longitudinais e obter o deslocamento abaixo da carga concentrada unitária na posição em que se deseja obter tais fatores. A constante de rigidez da mola para essa viga é o inverso do seu deslocamento;
- 2) Construir um modelo de barras para a seção transversal como apresentado na Figura 10, usando para seção transversal dos elementos a largura equivalente a $L/3$ e altura da espessura da laje;

Figura 10 - Pórticos para seções transversais de diferentes pontes



Fonte: Adaptado de Li, Chen, (2011)

- 3) Posicionar aleatoriamente a carga móvel ao longo da seção do modelo da ponte e calcular a máxima reação vertical em cada mola;
- 4) A proporção da reação máxima em relação ao peso total do caminhão é o fator de distribuição da carga móvel para esta viga nesta posição.

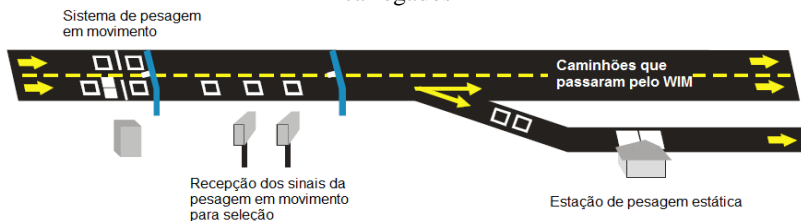
Este processo foi analisado para vários tipos de pontes: com vigas em aço biapoiadas, considerando diferentes vãos e espaçamentos entre vigas; em pontes com seções celulares e para pontes com vigas protendidas contínuas. Os resultados do modelo foram comparados com os resultados das equações LRFD e com modelos de elementos finitos. Os fatores de distribuição transversal obtidos pelo método BESM foram geralmente maiores que os obtidos por elementos finitos, porém semelhantes e um pouco inferiores aos obtidos pela norma americana.

3. SISTEMAS DE PESAGEM EM MOVIMENTO

Sabe-se que solicitações acima das previstas em projeto podem ocasionar degradações prematuras na estrutura e no pavimento ou ainda levar a ruína tal estrutura que foi projetada para carregamento inferior, sendo este o principal motivo para impor limites às cargas transportadas. Com o intuito de verificar o carregamento real dos caminhões sobre as rodovias para fiscalização do cumprimento da lei, é feita a pesagem de alguns veículos comerciais. No Brasil esta pesagem é feita com balanças estáticas sobre as quais o veículo deve parar completamente, o que impossibilita a medição de toda a frota.

A tecnologia de pesagem em movimento, também chamada de WIM (weigh in motion) permite pesar veículos, obtendo informações de peso bruto e por eixos ou grupos de eixos, sem precisar parar o veículo. Diferente das estações de pesagem, os locais de pesagem em movimento ficam sobre a rodovia, quase imperceptíveis aos veículos passantes, dificultando o uso de artifícios do transportador para evitar a fiscalização. Desta forma podem-se pesar todos os veículos e não somente uma amostra, muitas vezes não representativa, do tráfego da rodovia. (QUILLIGAN, 2003).

Figura 11 - Sistema WIM para pré-selecionar veículos excessivamente carregados



Fonte: Quilligan (2003).

O sistema de pesagem em movimento consiste em sensores incorporados ao pavimento, em uma ou mais faixas, na direção perpendicular ao tráfego. Eles podem ser utilizados para pesagem em movimento a baixa velocidade ou a velocidade diretriz da via e para tanto utilizam diversas tecnologias compatíveis com suas funções. Eles se propõem justamente a funcionar como selecionadores dos potenciais infratores. A Figura 11 mostra um sistema de pesagem em movimento usado para pré-selecionar possíveis veículos com sobrepeso. (BRITO et al., 2013).

Dentre as tecnologias de sensores mais utilizadas por sistemas WIM estão: sensor de fibra ótica, tubo pneumático, “laços” indutivos (ILD), cabos piezelétricos, sensores magnéticos e sensores WIM (tais como piezelétrico, “bending plate” e célula de carga - load cell). O custo de implantação deste sistema é relativamente baixo comparado aos postos de pesagem existentes. A Figura 12 ilustra a instalação de um sistema WIM. (BRITO et al., 2013).

Figura 12 - Instalação de sistema WIM com sensores piezoelétricos.



Fonte: Gostman (2011).

O sistema WIM já foi implantado na Europa e vem sendo bastante estudado desde os programas COST323 em 1999, um trabalho intergovernamental europeu de cooperação para pesquisas na área da ciência e tecnologia, e WAVE (Weighing in motion of Axles Vehicles for Europe) desenvolvido no quarto Framework Programme (Transport) em 2001. Estes programas tinham como objetivos analisar as necessidades de WIM na Europa, testar sistemas WIM existentes e novos protótipos, desenvolver documentos normativos para o sistema WIM, criar uma base de dados e expor os conhecimentos adquiridos. (CARVALHO NETO, 2014).

Durante esses projetos, foi criada, então, uma classificação das pesagens obtidas com WIM de acordo com sua precisão, para avaliação dos dados obtidos em relação às pesagens estáticas, variando de A a E. Os sistemas classificados como classe A podem ser usados com fins

legais, para verificar pesos limites de veículos comerciais. Classes B e C podem ser usados para pré-seleção de veículos e para projetos de infraestrutura. Resultados enquadrados como classes D e E podem ser usados apenas para fins estatísticos tais como caracterização da composição do tráfego. (JACOB; O'BRIEN, 1998 apud QUILLIGAN, 2003).

A Tabela 3 (COST323, 1999) mostra os limites entre as categorias criadas, de acordo com o intervalo de confiança medido em porcentagem. Nota-se que para o peso bruto total os valores são mais rígidos que para as cargas por eixo ou grupos de eixos. (QUILLIGAN, 2003).

Tabela 3 - Tolerâncias das classes de precisão de acordo com COST323 1999.

Tipo de medida	Domínio de uso	Classes de precisão:					
		Intervalo de confiança de δ (%)					
		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D(25)	E
1.Peso bruto	Peso bruto > 3,5 tn	5	7	10	15	25	>25
2.Grupo de eixos		7	10	13	18	28	>28
3.Eixo simples	Carga por eixo > 1 tn	8	11	15	20	30	>30
4.Eixo de um grupo		10	15	20	25	35	>35

Fonte: adaptado de COST 323 (1999).

Ainda no programa COST323 1999 foram criados quatro níveis de confiança relacionados a condições de repetibilidade e reprodutibilidade, que dependem do número de veículos de calibração, velocidade, posição lateral e número de passagens sobre a via. Quanto a condições ambientais, três níveis foram criados, variando de acordo com o tempo de obtenção das leituras, dias, semanas, anos, e condições climatológicas e de temperatura, podendo-se avaliar variações sazonais.

No Brasil este sistema começou a ser avaliado recentemente. Há estudos relacionados à precisão das pesagens em altas velocidades e obtenção do espectro de cargas de dada rodovia, como o desenvolvido por Britto et al. (2013) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul na BR290/RS (FreeWay). O estudo desenvolvido por Goltsman (2011), do Labtrans da UFSC, na BR-101 em Araranguá, visava a melhoria dos processos de fiscalização do peso dos veículos, automatizando o sistema e gerando uma base de dados de tráfego rodoviário nacional. Há ainda

alguns relatórios técnicos feitos em parceria do DNIT com algumas empreiteiras, dentre outros estudos.

Para fins de engenharia os dados obtidos na pesagem em movimento podem ser usados como dados de projeto e calibração de modelos; monitoramento de infraestrutura e avaliação de fadiga ou de cargas extremas; inspeção e estratégias de reforço.

Um dos sistemas de pesagem em movimento que vem sendo bastante estudado e já aplicado para análises de segurança de estruturas é o sistema de pesagem em movimento em pontes, chamado BWIM (Bridge Weigh in Motion). Amplamente utilizadas nos países desenvolvidos, as técnicas de BWIM são também utilizadas em alguns desses locais para calibrar modelos de carga móvel utilizados em projeto. O sistema consiste no uso de uma ponte instrumentada com sensores de deformação como uma balança para pesagem dos veículos. Segundo Žnidarič et al. (2012), a principal vantagem dos sistemas BWIM é o fato de eles serem totalmente portáteis e não interferirem no tráfego durante a sua instalação.

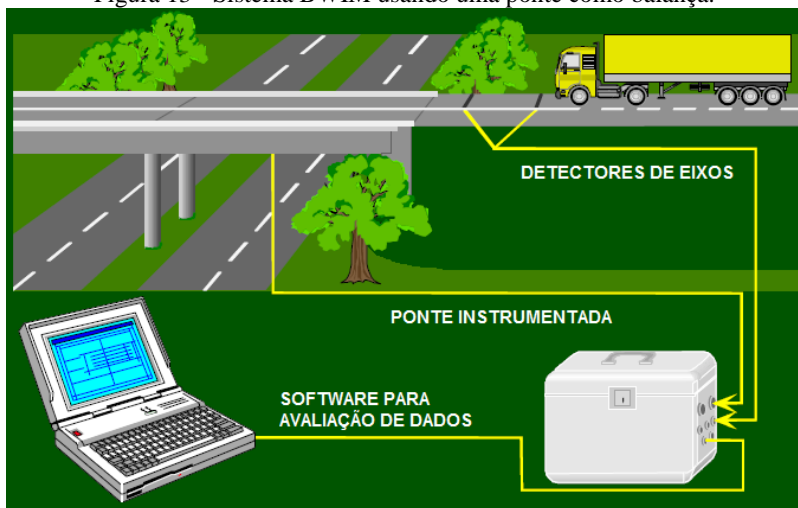
Além do peso dos veículos, os sistemas BWIM possibilitam obter informações como velocidade, peso por eixo, LI real da estrutura, coeficiente de impacto, distribuição transversal das cargas e dados de deformação. Essas informações podem ser úteis para análise da estrutura da ponte.

3.1. Sistemas de pesagem em movimento em pontes

Proposto inicialmente pelo Professor Fred Moses em 1979, o sistema BWIM baseia-se em medidas de deformação, obtidas por meio de extensômetros instalados sob a ponte. Os sinais são obtidos durante toda a passagem do veículo sobre a estrutura, sendo gravados na frequência de leitura do sistema (tipicamente de 256 Hz a 1024 Hz). A partir destes sinais, pode-se obter os pesos dos eixos dos veículos, usando um algoritmo, sendo o algoritmo de Moses o mais conhecido e aplicado nos sistemas comerciais. (OBRIEN; GONZÁLEZ; DOWLING, 2010).

A Figura 13 ilustra como funciona um sistema de pesagem em movimento em pontes, no qual a ponte é instrumentada e os sinais são enviados para um software que retorna medidas de pesos dos eixos.

Figura 13 - Sistema BWIM usando uma ponte como balança.



Fonte: Znidaric, 1998, apud Quilligan, 2003

Dentre as vantagens desse sistema está o fato de os sensores não serem vistos pelos transportadores, pois não há nenhum instrumento instalado sobre o pavimento, evitando que os motoristas de veículos pesados desviem sua rota. A instalação do sistema é relativamente simples e não requer que o trânsito seja interrompido, já que os extensômetros ficam embaixo da ponte. O sistema pode ser facilmente removido e instalado em outra ponte em pouco tempo, possibilitando instrumentar várias pontes com baixo custo. (BROWN, 2011). Além disso, assim como nos outros sistemas WIM, os veículos podem ser pesados em altas velocidades, evitando paradas em postos de pesagem. Com tal sistema obtêm-se dados do tráfego tais como: quantidade de veículos, número de eixos de cada veículo bem como peso dos eixos e espaçamento entre eles. (OBRIEN; GONZÁLEZ; DOWLING, 2010). A partir das respostas da ponte à passagem de uma dada carga é possível avaliar o comportamento estrutural da ponte em questão, verificando deformações e o momento solicitante real, que pode ser comparado ao momento resistente. (ZHAO e UDDIN, 2010). Devido à gravação contínua de dados dinâmicos de deformação da ponte com a passagem dos veículos, o sistema também possibilita informações sobre o fator de impacto dinâmico, fator de distribuição lateral e resposta dinâmica da ponte que podem ser posteriormente usados para outras avaliações em pontes existentes. (ZHAO et al, 2014).

O algoritmo usado nos sistemas de pesagem em movimento em pontes faz uso do conceito de linhas de influência. As linhas de influência podem ser obtidas por análise estrutural, porém os resultados geralmente não correspondem às medidas das pesagens reais, sendo mais efetivo usar uma LI obtida por medidas diretas do efeito do carregamento a partir da passagem de um veículo conhecido. (OBRIEN; QUILLIGAN; KAROUMI, 2006). Logo, sistemas de pesagem em movimento em pontes podem ser ferramentas para obtenção de linhas de influência reais, considerando as reais condições de apoio da ponte, que podem ser usadas para avaliação da estrutura ou ajuste de critérios de projeto.

3.1.1. A evolução dos sistemas BWIM

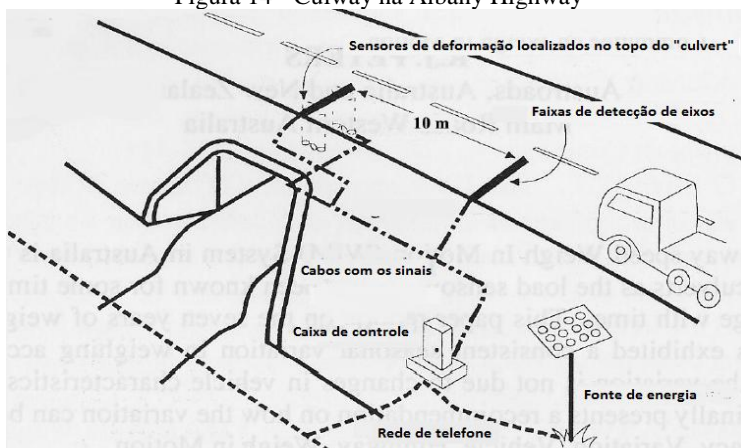
O sistema BWIM foi criado nos Estados Unidos por Moses em 1979, que sugeriu o uso de vigas de pontes instrumentadas para prever o peso de eixos dos caminhões em movimento. Moses desenvolveu o algoritmo que será apresentado no item seguinte e o aplicou em uma ponte de 3 vãos, da qual só o primeiro foi instrumentado, obtendo resultados com erros inferiores a 10%. Para obtenção dos pesos dos veículos por meio deste sistema de pesagem em movimento em pontes, seriam necessárias as medidas de deformação, obtidas pelos sensores, e as ordenadas da linha de influência sob cada eixo. Para que pudesse ser obtida a linha de influência real do sistema, que resultaria em erros inferiores aos obtidos usando a linha de influência teórica, foi feita previamente uma etapa de calibração usando veículos com espaçamentos entre eixos e pesos conhecidos, obtidos a partir de pesagens estáticas. Assim, já com as ordenadas da linha de influência real da ponte em questão, usou-se o processo inverso da calibração, obtendo os pesos dos eixos, como inicialmente desejado. Moses sugeriu ainda que vãos curtos (abaixo de 18,3 m ou 60 pés) são mais adequados para medir os pesos de eixos individuais, enquanto vãos longos (acima de 24,4 m ou 80 pés) são mais indicados para medir o peso bruto total. Seu método é usado até hoje. (BROWN, 2011).

O próximo maior desenvolvimento em pesagem em movimento em pontes ocorreu em 1984 na Austrália, quando Peters desenvolveu o sistema AXWAY (*axle weigh-in-motion system*). (apud BROWN, 2011). Este sistema assume que o peso bruto do veículo é proporcional à área abaixo da linha de influência. O peso total do veículo é determinado pelo cálculo da área abaixo da curva do sinal gravado e

multiplicado por um fator de correção e os pesos dos eixos são determinados por um processo iterativo, variando seus valores até obter uma boa correlação entre as medições e a resposta esperada. O sistema foi aplicado numa ponte de 17 m de comprimento e apresentou, no entanto, problemas com os computadores da época, pois, devido ao elevado número de iterações o tempo de processamento era muito longo. Outro ponto negativo desse sistema é a necessidade de um operador. (QUILLIGAN, 2003).

Anos depois, em 1986, Peters desenvolveu um sistema mais efetivo, usando galerias (*culverts*), chamado CULWAY. (apud QUILLIGAN, 2003). Devido à pequena extensão destas pontes e viadutos no sistema laje-parede de contenção, ao solo em volta da galeria que amortece os impactos e a inexistência de juntas de dilatação, foram removidos os efeitos dinâmicos. O sistema foi aplicado na Albany Highway e envolvia dois detectores de eixos na superfície de rolamento, um 9,8 m antes do centro da galeria e outro 0,2 m após o meio do vão, com os quais era possível determinar a velocidade e o espaçamento entre eixos. A Figura 14 mostra o sistema instalado. Quando o primeiro eixo do veículo atingia o primeiro sensor o sistema retornava um valor de deformação. Quando o segundo sensor era atingido lia-se outra medida de deformação. Essa diferença entre as deformações obtidas em cada sensor seria proporcional ao peso do eixo, porém devido a uma não linearidade observada deveria ser feita uma correção sem a qual os pesos dos eixos ficariam superestimados.

Figura 14 - Culway na Albany Highway



Fonte: Peters, 1998, apud Quilligan, 2003.

O SiWIM, desenvolvido de 1996 a 1999 pelo Instituto ZAG na Eslovênia é agora um sistema BWIM disponível comercialmente. Este usa o algoritmo de Moses para obter os pesos por eixos e passa posteriormente por um algoritmo de otimização que melhora a precisão dos resultados. (QUILLIGAN, 2003).

Desde que foi criado, o SiWIM já passou por mudanças significativas. Nas primeiras versões deste sistema BWIM, usando os conhecimentos obtidos em estudos até então desenvolvidos, a velocidade, número de eixos e o espaçamento entre estes eram obtidos por detectores de eixos fixados na superfície de rolamento. Pelo menos dois sensores eram dispostos separados por uma distância conhecida em cada pista em estudo. Esses detectores de eixos são do mesmo tipo dos usados em sistemas WIM, tais como sensores de fibra óptica, tubos pneumáticos, laços indutivos, tipo fita, apresentando como principais desvantagens os processos de instalação e manutenção que causam transtornos no tráfego e o fato de sofrerem deterioração com o tempo. As novas gerações do SiWIM usam sinais de transdutores adicionais fixados abaixo da ponte, preferencialmente sob a laje. O sistema também é chamado de FAD – *Free of Axle Detectors* – (sem detectores de eixos) ou NOR – *Nothing-On-the-Road* – (nada na pista). Os algoritmos básicos NOR usados no SiWIM calculam a correlação entre os tempos entre os picos no sinal do primeiro e do segundo transdutores. Usando a distância entre os sensores e o intervalo de tempo determina-se a velocidade e a partir desta velocidade pode-se determinar a distância entre os eixos. (KALIN, ZNIDARIC, LAVRIC, 2006).

De acordo com as informações do fabricante, o sistema SiWIM comercializado é composto de simples sensores de deformação, amplificadores precisos, rápidos conversores de sinal e o software desenvolvido pelo ZAG e CESTEL que deve ser instalado em um computador com bom desempenho. Como qualquer outro sistema de pesagem em movimento, precisa ser calibrado com caminhões de peso conhecido. A precisão dos resultados do SiWIM depende do tipo de estrutura, da qualidade da instalação, da calibração e particularmente da uniformidade do pavimento na entrada da ponte. Do ponto de vista estrutural, o SiWIM pode ser usado na maioria dos tipos de ponte como pontes em laje somente, pontes com vigas e laje, seções caixão e decks ortotrópicos, sendo necessário observar as condições do pavimento e algumas limitações geométricas, recomendando-se o uso em pontes de 6 a 20 m de comprimento, obtendo também bons resultados para pontes

de mais de 30 m caso haja elementos secundários transversais. (CESTEL, 2015).

Atualmente muitas pesquisas desenvolvem novos métodos de pesagem em movimento em pontes como em O'Brien, Quilligan e Karoumi (2006), OBrien, González e Dowling (2010), González et al (2012), Zhao e Uddin (2010), Zhao et al (2014), Ieng (2015), dentre outros. Estuda-se a modificação do algoritmo de Moses, o uso de mais sensores, a redução efeitos de dinâmicos, a avaliação das cargas em duas direções, e muitos outros métodos. Buscando precisão, com fins acadêmicos, comerciais, legais, para avaliação estrutural ou obtenção de dados estatísticos, o sistema BWIM continua evoluindo em todo o mundo.

3.1.2. Algoritmo de Moses

O algoritmo desenvolvido por Moses baseia-se no fato de que uma carga móvel sobre a ponte gerará tensões proporcionais à soma dos produtos dos pesos dos eixos e suas correspondentes ordenadas da linha de influência. A linha de influência em questão é definida como o momento fletor no ponto medido devido a uma carga unitária passando sobre a ponte.

Para um veículo de n eixos pode-se então obter o momento fletor teórico com a Equação (3.1):

$$M_{ST} = P_1 I_1 + P_2 I_2 + \dots + P_n I_n = \sum_{i=1}^N P_i I_i \quad (3.1)$$

Onde: M_{ST} é o momento fletor solicitante teórico;

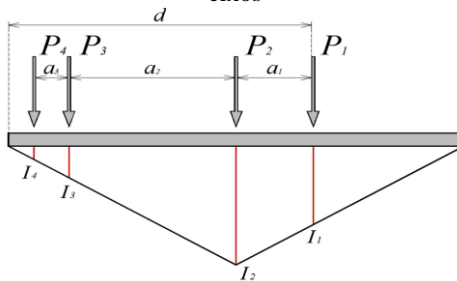
N é o número de eixos do veículo;

P_i é o peso de cada eixo;

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

A Figura 15 exemplifica a obtenção do momento solicitante na seção do meio do vão para um veículo de quatro eixos.

Figura 15 - Obtenção do momento fletor a partir da LI pra um veículo de 4 eixos



Fonte: Junges, Pinto e Miguel (2014)

Na prática o momento fletor pode ser obtido a partir dos esforços gerados na viga. Sabe-se que em cada ponto das vigas da ponte 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 viga j;
 M_j é o momento fletor na viga j;
 W_j é o módulo elástico da seção.

Considerando que tensão e deformação são proporcionais e relacionadas apenas pelo módulo de elasticidade do material, em uma estrutura com j vigas longitudinais, cada uma instrumentada com extensômetros na direção longitudinal pode-se obter o momento fletor total no ponto em estudo como o somatório dos momentos fletores em todas as vigas. Considerando também vigas iguais, todas então com mesmo W, o momento solicitante é dado pela Equação (3.3).

$$M_{SE} = \sum_{j=1}^j M_j = \sum_{j=1}^j EW_j \varepsilon_j = EW \sum_{j=1}^j \varepsilon_j \quad (3.3)$$

Onde: M_{SE} é o momento solicitante experimental;
 E é o módulo de elasticidade do material da ponte (considerado o mesmo para todas as vigas);
 ε_j é a deformação em cada viga.

Logo, a soma de todas as deformações das vigas é proporcional ao momento fletor total, relacionados pela constante EW , que na teoria pode ser calculada usando a geometria da seção e as propriedades do material. Conhecendo-se a carga P e tendo os valores das deformações pode-se também obter o valor de EW igualando as duas equações. Em sistemas de pesagem em movimento em pontes é comum determinar o módulo de elasticidade E e o módulo elástico W de cada viga teoricamente e assim, ao igualar as equações de momento fletor, ter como incógnitas, ora as ordenadas da linha de influência, ora os pesos dos eixos dos veículos.

Em um sistema BWIM, onde são instalados sensores de deformação de resistência elétrica com frequências de leituras em torno de 512 Hz, por exemplo, a passagem de um veículo a uma velocidade de 10 m/s (36 km/h) sobre uma ponte de 10 m de comprimento dura 1 segundo e gera mais de 512 leituras, pois as leituras são efetuadas até o término da passagem do caminhão, fazendo com que o número de leituras dependa do tamanho deste. Para cada uma dessas leituras, em cada instante k , pode-se calcular um momento fletor. Define-se então uma equação para o momento fletor total em função do tempo ou do número de leituras, como a apresentada na Equação (3.4), apresentada por Quilligan (2003), segundo Moses. Conhecendo a velocidade e o espaçamento entre os eixos é possível definir uma ordenada da linha de influência para cada eixo em função do tempo ou leituras.

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

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

Onde: M_{ST} é o momento fletor teórico;

P_i é o peso de cada eixo;

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

C_i é o número da leitura correspondente ao eixo distante L_i (logo C_1 é igual a zero);

L_i é a distância entre o eixo i e o primeiro eixo (então L_1 também é zero);

f é a frequência de leituras em Hz;

v é a velocidade em m/s;

As Figuras 16 a 18 explicam melhor este comportamento.

Usando como exemplo um caminhão de 3 eixos, como apresentado na Figura 16, pode-se perceber que a partir do momento em que o primeiro eixo do caminhão entra na ponte, começa a ser medida a deformação. Quando o último eixo chega ao fim da ponte tem-se a última leitura K . A quantidade de leituras depende, além do tamanho do vão da ponte (aqui chamado L_{ponte}) e do tamanho do caminhão, da frequência de aquisição do aparelho e da velocidade de passagem do caminhão. Para uma mesma velocidade, quanto maior a frequência, maior número de leituras. Para uma mesma frequência de aquisição, quando maior a velocidade menor o número de leituras. Há um número fixo de leituras correspondentes à distância entre eixos, que são os intervalos C_i apresentados nas equações anteriores, obtidos usando as distâncias L_i .

A Figura 17 mostra a linha de influência da ponte, numa situação genérica, considerando um caminhão de N eixos cujos pesos de cada eixo são conhecidos ($A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_N$). Num dado instante k após o início da passagem do caminhão sobre a ponte, pode-se obter a ordenada da linha de influência I_k , sob o primeiro eixo do veículo. As ordenadas da linha de influência sob os outros eixos, I_2, I_i, I_N , são nomeadas, $I_{k-C_2}, I_{k-C_i}, I_{k-C_n}$ respectivamente, como mostram as expressões apresentadas em (3.6).

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{K-C_1} & I_2 &= I_{K-C_2} & I_i &= I_{K-C_i} & I_n &= I_{K-C_n} \\
 C_1 &= L_1 f/v = 0 & C_2 &= L_2 f/v & C_i &= L_i f/v & C_n &= L_n f/v
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Figura 16 - Obtenção das leituras de deformação com a passagem do caminhão

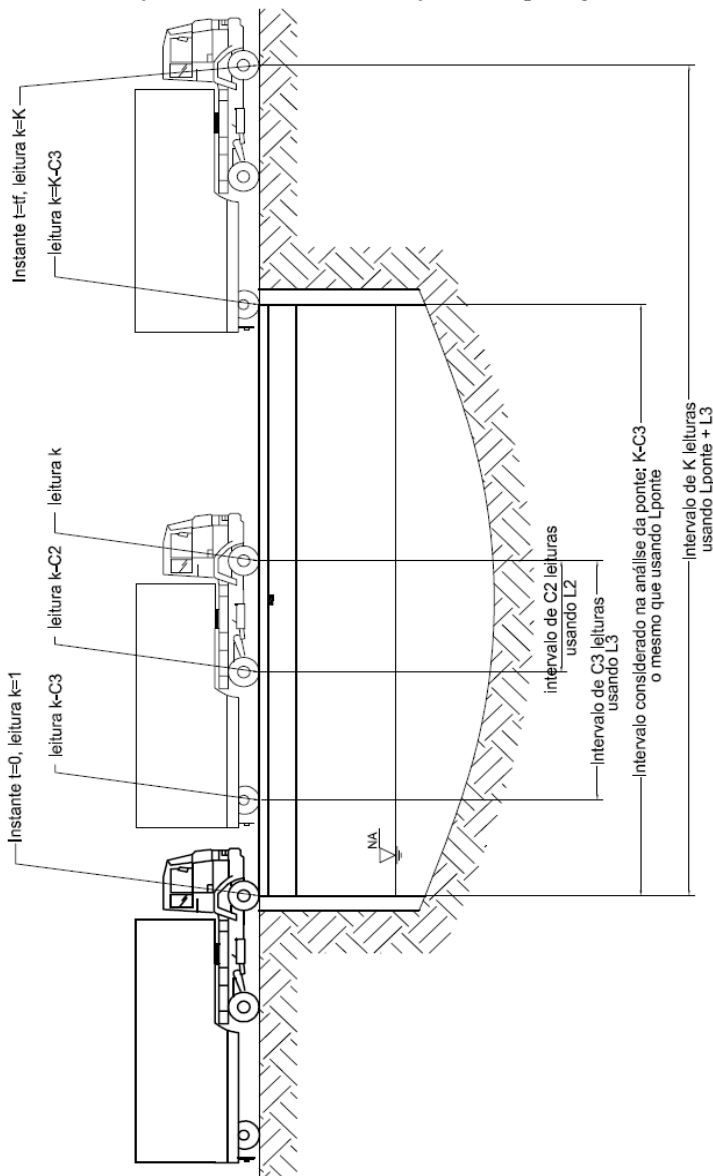


Figura 17 - Cargas axiais atuando sobre a ponte, distâncias L_i e ordenadas da LI

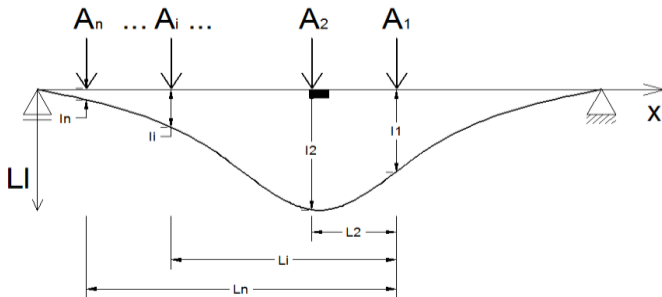
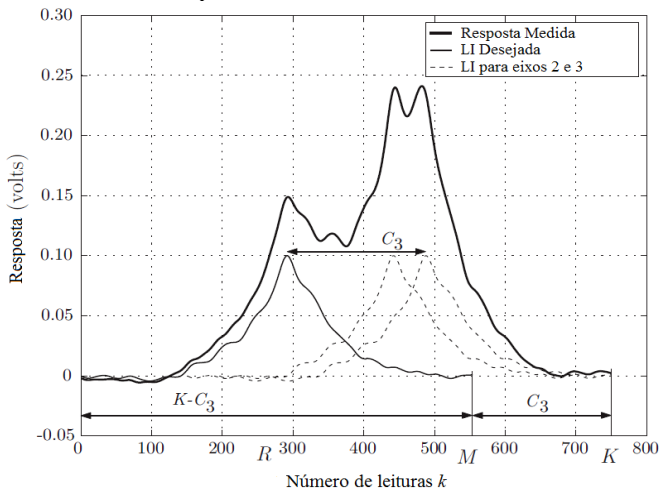


Figura 18 – Exemplo de sinal elétrico obtido como resposta do extensômetro para caminhão de 3 eixos.



Fonte: Quilligan, 2003.

A resposta obtida pelos sensores de deformação (strain gauges) é inicialmente um conjunto de K valores de sinais elétricos, posteriormente transformados em valores de deformação, por meio de multiplicação por uma constante de transformação. O sinal proveniente da resposta do aparelho é apresentado em forma de gráfico como na Figura 18. Este foi obtido usando um veículo de 3 eixos. 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, indicando maior deformação no ponto de instalação do sensor naquele momento. O fato de haver 3 picos evidencia a

passagem de 3 eixos. Na mesma figura pode-se observar novamente os valores de K (todas leituras), C_3 (número de leituras entre o primeiro e o último eixo) e $K-C_3$ (o número de leituras correspondente ao tamanho da ponte).

Os momentos fletores obtidos experimentalmente, usando as medidas de deformação e as propriedades da peça, podem ser comparados aos momentos fletores teóricos, obtidos pelos pesos dos eixos do veículo e da linha de influência da ponte. Haverá, contudo, diferenças entre os momentos fletores obtidos por formas diferentes. Todavia, espera-se que essa diferença seja bem pequena, indicando que os valores previstos estejam próximos aos reais. Moses define assim uma função erro igual à soma dos quadrados das diferenças entre o momento fletor medido M_{SE} e o momento fletor calculado M_{ST} como a Equação (3.7) que segue:

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

Onde: K é o numero total de leituras.

É importante ressaltar que este sistema BWIM descreve o comportamento estático de uma ponte sob uma carga móvel unitária. Na realidade, porém, a resposta da ponte não é estática. Há várias interferências tais como variações de velocidade e rugosidade da pista que incluem efeitos dinâmicos ao sistema. No entanto considera-se que o grande número de leituras obtidas durante a passagem de um único caminhão possa suavizar esses componentes dinâmicos. Estes erros estão inclusos na equação de Moses apresentada na Equação (3.7).

3.1.3. Obtenção da 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 biapoiada ou biengastada como considerada nas linhas de influência teóricas usadas para obtenção dos esforços no projeto. De acordo com o estudado por Znidaric e Baumgärtner (1998) *apud* Quilligan (2003), a linha de influência real em muitas pontes recai entre as condições de apoio de viga simplesmente apoiada e

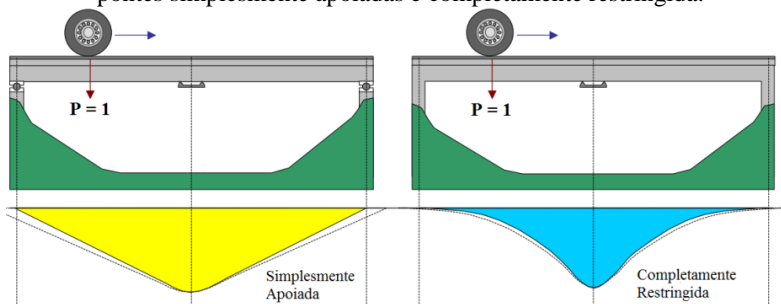
completamente engastada. Além de a real vinculação ser desconhecida, o material, no caso do concreto armado, bastante heterogêneo, não possui o comportamento ideal considerado nos cálculos o que influencia na resposta da ponte. Isso, dentre outros fatores como execução da estrutura, aspectos ambientais como interação solo-estrutura, ou quaisquer efeitos dinâmicos envolvidos, faz com que duas pontes que tenham exatamente o mesmo projeto não necessariamente apresentem a mesma linha de influência real. Estes fatos tornam uma linha de influência calculada teoricamente inadequada para os fins do algoritmo BWIM. A obtenção das linhas de influência reais bem como novos métodos para obtê-las vem, portanto, sendo cada vez mais estudados.

Estudos iniciais testavam primeiramente a linha de influência teórica com algumas modificações aplicadas a fim de obter maior precisão. Znidaric e Baumgärtner, em 1998, desenvolveram um estudo sobre a importância da escolha de uma linha de influência que seja próxima à linha de influência real. Duas pontes foram avaliadas, uma pequena com 2 m de vão e outra maior com vão de 32 m. Para simular o sinal de resposta da ponte foram selecionadas linhas de influência entre dois casos limites (as linhas de influência da estrutura simplesmente apoiada e completamente restringida). Os pesos por eixo previstos mostraram-se bastante imprecisos caso uma linha de influência incorreta fosse escolhida, principalmente para a ponte de maior vão. Quanto maior a diferença entre as deformações medidas e previstas a partir das linhas de influência estudadas, maiores os erros. Enquanto para a ponte de 2 m os erros encontrados para o peso bruto e por eixos ficaram em torno de 10%, para a ponte de 32 m de vão os erros foram superiores a 100%, notando-se uma redistribuição das cargas dos eixos, que apresentaram resultados piores que o peso bruto total. Znidaric propôs uma revisão da linha de influência teórica, ajustando-a por outras condições de apoio, tal como o uso de molas, e suavizando os picos, usando processo iterativo (Znidaric e Baumgartner, 1998 apud Brown, 2011). Essas linhas de influência ajustadas para o caso biapoiado e biengastado são mostradas na Figura 19.

As condições de apoio podem ser assumidas como semirrígidas ou com apoios elásticos. Esse procedimento apresenta uma boa correlação entre a resposta teórica e a medida, porém vários fatores como a flexibilidade do pavimento, interações solo-estrutura, envelhecimento dos materiais e condições de apoio desconhecidas

levam a uma LI inadequada para aplicações em B-WIM (QUILLIGAN, 2003).

Figura 19 – LIs ajustadas do momento fletor na seção no meio do vão para pontes simplesmente apoiadas e completamente restringida.



Fonte: Adaptada de Znidaric e Baungärtner 1998, apud Quilligan 2003.

Já que com a utilização da linha de influência teórica não são obtidos resultados satisfatórios, deve-se procurar obter a linha de influência real da estrutura. Esta pode ser obtida numericamente a partir de esforços provenientes da passagem de um veículo de peso conhecido, utilizando-se uma variação do algoritmo de Moses.

O conjunto de valores de ordenadas da linha de influência, I , que minimiza o erro φ dado pela Equação (3.7) é o obtido quando as derivadas parciais são nulas. Para o caso de um caminhão com 3 eixos, com todos eles sobre a ponte, a derivada da função φ em relação à ordenada da linha de influência I_R , pode ser escrita como na Equação (3.9).

$$\varphi = \sum_{k=1}^K [M_k^{SE} - (P_1 I_k + P_2 I_{k-C_2} + P_3 I_{k-C_3})]^2 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial I_R} = 2[M_R^{SE} - (P_1 I_R + P_2 I_{R-C_2} + P_3 I_{R-C_3})](-P_1) + 2[M_{R+C_2}^{SE} - (P_1 I_{R+C_2} + P_2 I_R + P_3 I_{R+C_2-C_3})](-P_2) + 2[M_{R+C_3}^{SE} - (P_1 I_{R+C_3} + P_2 I_{R-C_2+C_3} + P_3 I_R)](-P_3) = 0 \quad (3.9)$$

Rearranjando a equação acima, chega-se a equação:

$$I_{R-C_3} P_1 P_3 + I_{R-C_2} P_1 P_2 + I_{R+C_2-C_3} P_2 P_3 + I_R (P_1^2 + P_2^2 + P_3^2) + I_{R-C_2+C_3} P_2 P_3 + I_{R+C_2} P_1 P_2 + I_{R+C_3} P_1 P_3 = P_1 M_R^{SE} + P_2 M_{R+C_2}^{SE} + P_3 M_{R+C_3}^{SE} \quad (3.10)$$

Que pode ser escrita em forma matricial como a Equação (3.11):

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{M} \quad (3.11)$$

A obtenção da linha de influência real a partir da resolução desta equação matricial é chamada por Quilligan (2003), O'Brien, Quilligan e Karoumi (2006) e Zhao e Uddin (2010) de Método da Matriz.

Como explicado no item anterior, $K-C_N$ é o número de medidas de deformação obtidas ao longo do vão da ponte. Na equação (3.11), \mathbf{I} é o vetor que contém as desejadas ordenadas das linhas de influência, \mathbf{M} é o vetor que depende dos pesos dos eixos dos veículos e das medidas de deformação lidas, como mostra a parte à direita da Equação (3.10), enquanto \mathbf{A} é uma matriz simétrica e esparsa que depende apenas dos valores dos pesos dos eixos.

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

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & 0 & \dots & a_{1,1+(C_2-C_1)} & 0 & \dots & a_{1,1+C_2} & 0 & \dots & a_{1,1+C_2} & 0 & \dots & \dots \\ a_{2,2} & 0 & \dots & a_{2,2+(C_2-C_1)} & 0 & \dots & a_{2,2+C_2} & 0 & \dots & a_{2,2+C_2} & 0 & \dots & \dots \\ & a_{3,3} & 0 & \dots & a_{3,3+(C_2-C_1)} & 0 & \dots & a_{3,3+C_2} & 0 & \dots & a_{3,3+C_2} & 0 & \dots \\ & & a_{4,4} & 0 & \dots & a_{4,4+(C_2-C_1)} & 0 & \dots & a_{4,4+C_2} & 0 & \dots & a_{4,4+C_2} & \dots \\ & & & \ddots & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & & & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & & & & & a_{K-C_2, K-C_2} \end{bmatrix}$$

Simétrica

A diagonal principal dessa matriz é dada pela soma dos quadrados dos pesos dos eixos dos veículos, correspondente ao valor que acompanha a ordenada da LI I_R na Equação 3.10, como mostra a Equação 3.12. O número de diagonais com valores diferentes de 0 (zero)

em cada lado da diagonal principal é dado por $\sum_{i=1}^{N-1} i$. Ou seja, para um veículo de 3 eixos haverá 3 diagonais não nulas acima da principal.

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

Essas diagonais no triângulo superior da matriz **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 matriz principal proporcionais às distâncias entre seus eixos (C_2-C_1 , C_3-C_1 e C_3-C_2). No caso do caminhão de 3 eixos, os valores para a primeira linha são os seguintes:

$$\begin{aligned} a_{1,1+(C3-C2)} &= P_3P_2 \\ a_{1,1+C2} &= P_1P_2 \\ a_{1,1+C3} &= P_1P_3 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Os elementos da parte triangular inferior são os mesmos, pois a matriz é simétrica.

O mesmo processo é feito para caminhões com mais eixos. A sequência de equações seguintes corresponde, de forma análoga, a um caminhão de 5 eixos e é aqui desenvolvida para melhor explicar a série de cálculos necessários para desenvolvimento dos algoritmos para obtenção da linha de influência a partir de veículos de calibração com diferentes números de eixos.

$$\varphi = \sum_{k=1}^K [M_k^{SE} - (P_1I_k + P_2I_{k-C2} + P_3I_{k-C3} + P_4I_{k-C4} + P_5I_{k-C5})]^2 \quad (3.14)$$

Derivando-a e igualando a zero tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial I_R} &= 2[M_R^{SE} - (P_1I_R + P_2I_{R-C2} + P_3I_{R-C3} + P_4I_{R-C4} + \\ &P_5I_{R-C5})](-P_1) + 2[M_{R+C2}^{SE} - (P_1I_{R+C2} + P_2I_R + P_3I_{R+C2-C3} + \\ &P_4I_{R+C2-C4} + P_5I_{R+C2-C5})](-P_2) + 2[M_{R+C3}^{SE} - (P_1I_{R+C3} + \\ &P_2I_{R-C2+C3} + P_3I_R + P_4I_{R+C3-C4} + P_5I_{R+C3-C5})](-P_3) + 2[M_{R+C4}^{SE} - \\ &(P_1I_{R+C4} + P_2I_{R-C2+C4} + P_3I_{R-C3+C4} + P_4I_R + P_5I_{R+C3-C5})](-P_4) + \\ &2[M_{R+C5}^{SE} - (P_1I_{R+C5} + P_2I_{R-C2+C5} + P_3I_{R-C3+C5} + P_4I_{R-C4+C5} + \\ &P_5I_R)](-P_5) = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Rearranjando a equação acima para o lado esquerdo chega-se a:

$$\begin{aligned}
 & (P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2 + P_5^2)I_R + P_1P_2I_{R-C_2} + P_1P_3I_{R-C_3} + P_1P_4I_{R-C_4} + \\
 & P_1P_5I_{R-C_5} + P_1P_2I_{R+C_2} + P_2P_3I_{R+C_2-C_3} + P_2P_4I_{R+C_2-C_4} + P_2P_5I_{R+C_2-C_5} + \\
 & P_1P_3I_{R+C_3} + P_2P_3I_{R-C_2+C_3} + P_3P_4I_{R+C_3-C_4} + P_3P_5I_{R+C_3-C_5} + P_1P_4I_{R+C_4} + \\
 & P_2P_4I_{R-C_2+C_4} + P_3P_4I_{R+C_3-C_4} + P_4P_5I_{R+C_4-C_5} + P_1P_5I_{R+C_5} + P_2P_5I_{R-C_2+C_5} + \\
 & P_3P_5I_{R-C_3+C_5} + P_4P_5I_{R-C_4+C_5}
 \end{aligned} \quad (3.16)$$

No lado direito tem-se:

$$P_1M_R^{SE} + P_2M_{R+C_2}^{SE} + P_3M_{R+C_3}^{SE} + P_4M_{R+C_4}^{SE} + P_5M_{R+C_5}^{SE} \quad (3.17)$$

A matriz **A** tem os elementos da diagonal principal os valores:

$$P_{k,k} = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2 + P_5^2 \quad (3.18)$$

O número de diagonais não nulas acima da diagonal principal é:

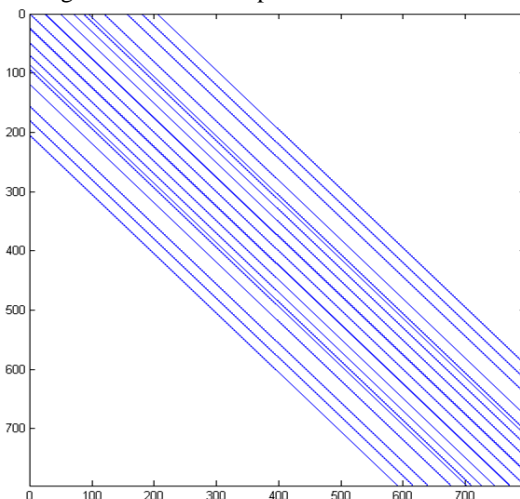
$$\sum_{i=1}^{N-1} i = 1 + 2 + 3 + 4 = 10 \quad (3.19)$$

Os valores que preenchem essas diagonais são:

$$\begin{aligned}
 a_{k,k+C_2} &= P_1P_2 \\
 a_{k,k+C_3} &= P_1P_3 \\
 a_{k,k+C_4} &= P_1P_4 \\
 a_{k,k+C_5} &= P_1P_5 \\
 a_{k,k+(C_3-C_2)} &= P_2P_3 \\
 a_{k,k+(C_4-C_2)} &= P_2P_4 \\
 a_{k,k+(C_5-C_2)} &= P_2P_5 \\
 a_{k,k+(C_4-C_3)} &= P_3P_4 \\
 a_{k,k+(C_5-C_3)} &= P_3P_5 \\
 a_{k,k+(C_5-C_4)} &= P_4P_5
 \end{aligned} \quad (3.20)$$

A matriz **A** fica preenchida como mostra a Figura 20. As linhas têm os valores apresentados e as partes sem linhas indicam valor zero.

O número de diagonais não nulas sobre a diagonal principal somente obedece à Equação (3.19) quando o caminhão é menor que a ponte estudada. Quando o veículo de calibração tem comprimento (distância entre o primeiro e o último eixos) maior que o vão da ponte o valor $K-C_N$ é menor que o valor C_N . Neste caso algumas das diagonais não aparecerão na matriz.

Figura 20 - Matriz **A** para veículo de 5 eixos

O vetor **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 2.21. Também tem ordem $K-C_N$, número de leituras correspondente ao tamanho da ponte.

$$\mathbf{M} = \left\{ \begin{array}{l} P_1 M_1^{SE} + P_2 M_{1+C2}^{SE} + \dots + P_N M_{1+CN}^{SE} \\ P_1 M_2^{SE} + P_2 M_{2+C2}^{SE} + \dots + P_N M_{2+CN}^{SE} \\ P_1 M_3^{SE} + P_2 M_{2+C2}^{SE} + \dots + P_N M_{3+CN}^{SE} \\ \vdots \\ P_1 M_{K-CN}^{SE} + P_2 M_{K-CN+C2}^{SE} + \dots + P_N M_K^{SE} \end{array} \right\} \quad (3.21)$$

O vetor **I** contém as desejadas ordenadas das linhas de influência, cujas linhas vão do ponto em que foi obtida a primeira leitura até $K-C_N$. Uma maneira de resolver o sistema é invertendo-se a matriz **A**.

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{M} \quad (3.22)$$

O vetor **I** encontrado armazena os valores das ordenadas da linha de influência em cada instante e ao ser plotado observa-se a linha de influência real.

Após feita a calibração com veículos conhecidos para determinar a linha de influência real, em análises de pesagem em movimento passa-se a fazer o contrário, o esforço é medido e o carregamento que causa este esforço, no caso o tráfego passante, o peso de cada eixo, é calculado.

3.1.4. Obtenção da velocidade e espaçamento entre eixos

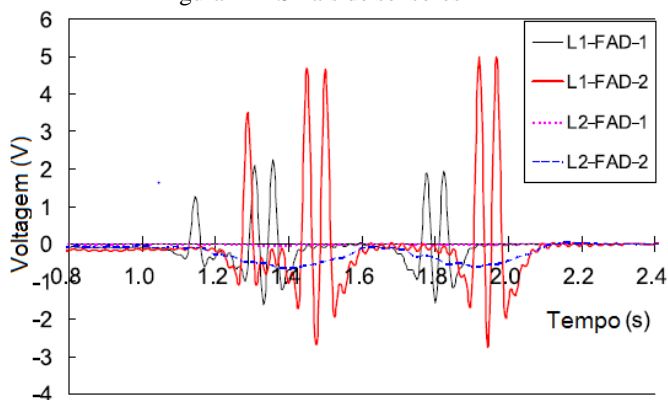
Para obtenção da velocidade e espaçamento entre eixos pode-se utilizar o sistema NOR BWIM, *Nothing On the Road Bridge Weigh In Motion*. Este sistema caracteriza-se pelo uso de sensores sob a laje, alinhados, longitudinalmente ao fluxo dos veículos, com um espaçamento conhecido. Assim são eliminados os detectores de eixos sobre a pista, como tubos pneumáticos ou sensores piezoelétricos, que ficam aparentes aos motoristas e que vão sendo danificados com o tempo. Por esse motivo o sistema é também chamado de FAD BWIM, *Free of Axles Detector*. (KALIN, ZNIDARIC, LAVRIC, 2006).

Por serem colocados sob a laje, os sinais obtidos por sensores FAD apresentam claros picos quando um eixo passa sobre a posição do sensor. Um caminhão com 5 eixos, por exemplo, apresentará 5 picos bem pronunciados, assim como terão 3 picos no sinal obtido pela passagem de um caminhão de 3 eixos. A distância entre os eixos também pode ser notada neste sinal. A Figura 21 mostra um exemplo dos sinais obtidos pelos dois sensores FAD dispostos na mesma linha. O caminhão passa primeiro pelo sensor FAD1 e depois pelo sensor FAD2, sendo que o sinal do segundo sensor é maior que do primeiro por estar localizado mais ao centro do vão, onde as deformações são maiores. Os picos do FAD1 serão nomeados como t_1, t_2, t_3, t_4 e t_5 e no FAD2, de mesmo modo, t_1', t_2', t_3', t_4' e t_5' . A velocidade pode ser obtida a partir das diferenças entre os tempos dos picos e da distância entre os dois sensores instalados L_{FAD} . (ZHAO et al, 2014).

$$v = \frac{L_{FAD}}{t_i' - t_i} \quad (3.23)$$

Onde $i = 1, 2, 3, 4, 5$

Figura 21 - Sinais de sensores FAD



Fonte: Adaptado de Zhao et al (2014).

Se a velocidade do veículo for mantida constante então independente de quais eixos sejam usados para o cálculo da velocidade o valor será o mesmo, já que o tempo entre os picos é o mesmo. É comum, no entanto que haja pequenas variações na velocidade durante a passagem do caminhão sobre a ponte.

Considerando a velocidade constante, o espaçamento entre um eixo i e o eixo seguinte $i+1$ é dado por:

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

Onde $i = 1, 2, 3, 4$

Com esses dados é possível calcular os valores s_i da equação do momento fletor teórico, M_{ST} , dada em (3.4) e (3.5).

3.1.5. Obtenção dos pesos dos eixos

A partir do momento em que se tem a linha de influência real da ponte pode-se calcular os pesos de cada eixo de qualquer caminhão passante. Os cálculos partem da mesma expressão usada antes:

$$M_k^{ST} = EW\varepsilon_k^t = P_1I_k + P_2I_{k-C_2} + \dots + P_NI_{k-CN} \quad (3.25)$$

Onde ε_k^t é o sinal previsto (teórico) para o instante k .

Esta equação pode ser escrita na forma matricial como:

$$EW \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{IL} \cdot \mathbf{P} \quad (3.26)$$

Nesta equação $\boldsymbol{\varepsilon}$ é o vetor com as medidas de deformação da ponte durante toda a passagem do caminhão, apresentando K valores. \mathbf{P} é o vetor com os pesos dos eixos do caminhão, que tem N valores. \mathbf{IL} é uma matriz com as ordenadas da linha de influência embaixo de cada eixo no instante em questão. Esta matriz tem N colunas, correspondentes ao número de eixos do caminhão e número de linhas K igual ao total de leituras de deformação registradas. Quando apenas o primeiro eixo está sobre a ponte os valores das linhas $k=1$ até $k=C_2-1$ nas colunas referentes a todos os outros eixos serão nulos, pois não há linha de influência sob esses eixos. A partir da entrada do segundo eixo na ponte $k=C_2$, já existem ordenadas na linha de influência referentes também ao eixo 2, e ainda terão valor zero as linhas correspondentes nas colunas dos outros eixos fora da ponte. 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 nulos. Quando o segundo eixo também deixa a ponte, a partir do instante $k=K-C_N+C_2$, na segunda coluna os valores nessas linhas serão zero. Esse comportamento é o mesmo para todos os eixos. A Equação (3.26) pode ser mais detalhada como a Equação (3.27) a seguir:

$$EW \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \vdots \\ \varepsilon_K \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_1^2 & \dots & I_1^N \\ I_2^1 & I_2^2 & \dots & I_2^N \\ I_3^1 & I_3^2 & \dots & I_3^N \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_K^1 & I_K^2 & \dots & I_K^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

Para encontrar os valores P_i dos pesos dos eixos deve-se minimizar a função erro apresentada na Equação (3.7). Zhao e Uddin (2010) apresentam a sequência de cálculos necessários para encontrar os pesos, partindo da função erro entre medidas de deformação teóricas e medidas, que pode ser escrita na forma matricial como:

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

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

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

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

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

Para obtenção do peso total basta somar todos os pesos dos eixos.

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

3.1.6. Características de pontes ideais para sistemas BWIM e NOR BWIM

Nem todas as pontes são adequadas para sistemas de pesagem em movimento, visto que em alguns estudos nos quais se aplicam novos algoritmos ou um sistema comercial, a classe de precisão atingida é inferior a C. O COST323 (1999) definiu, então, critérios para classificar uma ponte em boa ou aceitável para análises de pesagem em movimento, como mostra a Tabela 4, cujos dados foram retirados do estudo de Quilligan (2003). A regularidade do pavimento depende do tamanho das fissuras, da deflexão e do índice de rugosidade deste pavimento, enquadrando-se, segundo a tabela 1 do apêndice 1 do COST 323, nas classes I - excelente, II - bom, e III - aceitável.

Tabela 4 - Critérios de seleção de uma ponte para análises BWIM

Critério	Ótimo	Aceitável
Tipo de ponte	Vigas de aço, vigas de concreto armado ou protendido, placas ortotrópicas de aço	Lajes de concreto
Vão (m)	5 – 15	8 – 35
Tráfego	Sem tráfego ou Congestionamento	
Regularidade do pavimento	Classe I ou II (*)	Classe III (*)
Curvatura (°)	≤10	≤25

(*) de acordo com a classificação desenvolvida no COST323

Brown (2011) estudou outros critérios favoráveis e desfavoráveis ao sistema de pesagem em movimento em pontes, contribuindo para o desenvolvimento de um software com a finalidade de selecionar pontes com características ideais para a implantação do sistema BWIM. O programa foi chamado ABST – Alabama BWIM Bridge Selection Tool – e contém dados de várias pontes e mapas. Neste estudo, foram selecionadas inicialmente pontes em concreto armado ou aço. Foram determinados 9 critérios para os quais, em cada ponte analisada, eram arbitrados valores maiores quanto mais favoráveis e menores quanto mais desfavoráveis. Ao final, todos os pontos deveriam ser somados numa nota para cada ponte. De acordo com essa nota foi estabelecido um ranking, no qual as pontes eram separadas como 1-Ideal, 2-Adequada, 3-Suficiente e 4-Inadequada.

Dentre as características estudadas cabe ressaltar os seguintes pontos:

- É preferível um menor número de vias, pois cada via adicional aumenta a incerteza quanto à posição transversal do caminhão e a possibilidade da presença de múltiplos veículos.
- Recomenda-se a escolha de pontes não enviesadas ou com ângulo próximo de zero, pois este ângulo complica a instalação do sistema, já que em pontes com grande viés seria recomendada a instalação dos sensores seguindo este ângulo.
- Pontes com juntas pequenas e mais bem conservadas causam menos efeitos dinâmicos e geram resultados mais precisos.
- São preferíveis pontes com o pavimento mais liso e com acesso suave, sem grandes impactos.
- O ideal é que a ponte esteja em linha reta, sem curvas, para que não haja grande alteração no posicionamento transversal.
- Embora o material, aço ou concreto, não influencie muito nos resultados, o sistema é mais facilmente instalado em pontes de concreto armado.

O software foi testado comparando três pontes na rodovia US-82 no Alabama. As características das pontes foram informadas ao protótipo e este retornou as devidas pontuações, enquadrando a segunda ponte na classe 2, enquanto as demais enquadraram-se na classe 3. O sistema Si-WIM foi instalado na melhor ponte e foi calibrado. Os pesos de veículos aleatórios foram medidos e os resultados apresentaram grau de precisão B(10), considerado bom, indicando que a classificação da ferramenta desenvolvida é eficiente. O software classificou mais de 19 mil pontes no estado por meio desses critérios. (BROWN, 2011).

Outras características ainda devem ser consideradas ao analisar os sistemas NOR BWIM ou FAD BWIM, nos quais os detectores de eixos são sensores de deformação fixados sob a laje da ponte.

De acordo com Kalin, Znidaric e Lavric (2006), quanto mais eixos sobre a ponte maior a dificuldade de identificar o espaçamento entre eles, devido à qualidade do sinal. Então as pontes ideais para o NOR BWIM seriam aquelas com vãos curtos ou com elementos que dividam os vãos como transversinas.

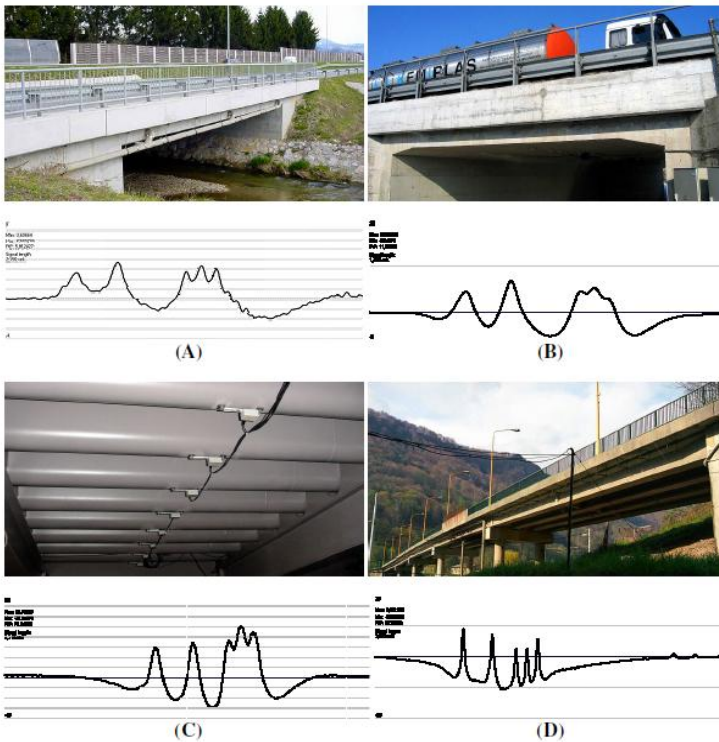
Além disso, lajes muito finas ou muito espessas tornam a identificação dos picos mais difícil. Para pontes em laje, sem vigas, o indicado seria que as lajes tivessem de 50 a 80 cm de espessura. Pontes de aço do tipo placas ortotrópicas, embora bastante finas, podem ser consideradas ideais para BWIM quando há elementos que dividem os vãos a cada 3 ou 5 m. (KALIN, ZNIDARIC e LAVRIC, 2006).

A Figura 22, retirada de mesmo estudo, mostra diferentes tipos de pontes usadas em sistemas BWIM e seus respectivos sinais obtidos pelos extensômetros com a passagem de um caminhão de 5 eixos. A primeira delas (A) é uma ponte em laje, com 0,5 m de espessura e 12 m de comprimento, apresentando efeitos dinâmicos, evidenciado pelos vários pequenos picos ao longo do sinal. Embora a ponte seja considerada fina e longa, os efeitos dinâmicos observados ocorreram principalmente devido a um impacto antes da entrada. A segunda (B) por outro lado é uma ponte de 0,8 m de espessura, também sem vigas, e vão bastante curto, de 6m, com superfície lisa, apresentando, assim, pouquíssimos efeitos dinâmicos. Nota-se, no entanto, que por ser bastante espessa, os picos são bem suaves, e, no caso de grupos de eixos, quase difíceis de encontrar. A terceira (C) é uma ponte de aço com comportamento de placa ortotrópica, bastante adequada para sistemas NOR BWIM, visto que seu sinal tem picos facilmente notados e poucos efeitos dinâmicos. A última delas (D) é uma ponte composta de vigas e laje, com vão relativamente grande, de 30,5 m. Os sensores foram colocados na laje, no meio do vão, próximos a transversina. Neste caso o sinal apresenta picos mais estreitos, com deformações maiores, como já esperado, pois nesses sistemas as lajes são mais finas.

Analisando as informações obtidas, nota-se que muitas pontes rodoviárias comuns, formadas por vigas e lajes com vãos em torno de 20 m, enquadram-se nos padrões de aceitabilidade desenvolvidos no COST323, e são adequadas para sistemas FAD ou NOR BWIM, pois as lajes finas apoiadas em vigas retornam sinais de fácil avaliação da velocidade e espaçamento entre eixos. Para que os resultados sejam

relativamente bons ainda é necessário analisar as condições do pavimento, entrada da ponte e das juntas de dilatação, que influenciam na qualidade do sinal. Alterações no posicionamento transversal do veículo, que tornam os resultados mais imprecisos, estão mais suscetíveis em pontes com várias vias ou com curvas. Para aplicação do método de pesagem em movimento em pontes, visando resultados de pesagem precisos, todos esses dados devem ser considerados ao escolher a ponte.

Figura 22 - Exemplos de pontes instrumentadas e sinais obtidos.



Fonte: Kalin, Znidaric e Lavric (2006).

É importante ressaltar aqui que, quando o objetivo da análise BWIM não é somente a pesagem dos caminhões em movimento, mas sim a avaliação da estrutura de determinada ponte, os resultados da pesagem provavelmente não serão tão precisos quanto os obtidos ao escolher uma ponte com todas as características descritas neste item. Ao

avaliar uma ponte degradada, as condições de acesso e do pavimento certamente apresentam grandes imperfeições que interferem no sinal, pois são introduzidos efeitos dinâmicos relevantes. Além disso a própria geometria da ponte pode não ser a mais adequada para obtenção do peso dos veículos pelo método BWIM. Nesses casos os erros maiores impedem que a ponte seja usada com fins legais, mas os dados podem ser usados estatisticamente e o comportamento da ponte pode ser devidamente avaliado.

3.2. Obtenção de linhas de influência reais com o sistema B-WIM

Muitos estudos vêm sendo feitos usando o sistema de pesagem em movimento em pontes, grande parte focando na obtenção da linha de influência dessas pontes tanto para fins de pesagem dos veículos, que resulta valores mais precisos quanto mais próxima à real for a linha de influência usada, quanto para avaliações estruturais.

O'Brien, Quilligan e Karoumi (2006), descreveram um método para obter linhas de influência a partir de medidas das respostas do carregamento, explicando passo a passo o uso do método da matriz, obtido pelas equações de Moses, como já exposto no item 3.1.3. Segundo os autores não há a necessidade de se conhecer o exato instante em que a carga começa a causar flexão na ponte e a incerteza em torno das condições de contorno reais e dos sinais muito pequenos próximos aos apoios não é relevante. O ponto de início da LI, correspondente ao primeiro instante em que o eixo toca a ponte, é geralmente uma referência fixa.

O método descrito foi aplicado em duas pontes de concreto na Suécia. Um caminhão de 3 eixos foi usado para testes na ponte de Ostermalms IP, com 10,5 m de vão. Os dados de deformação foram coletados com frequência de 1024 Hz, gerando matrizes com ordem de 1500 a 2000. A linha de influência obtida a partir dos sinais dos caminhões conhecidos foi usada para cálculo dos pesos e previsão dos sinais de deformação. A resposta prevista foi comparada à medida, apresentando sinais de deformação bem semelhantes à deformação real. Para encontrar a linha de influência da ponte de Kramfors, de 14 m, foi usado um caminhão de 7 eixos. Os dados de deformação foram coletados, com frequência de 512 Hz. Nesta ponte os pesos calculados também se aproximaram dos reais, porém algumas diferenças foram apontadas e os autores sugeriram que o elevado número de eixos é a causa mais provável. Concluiu-se, então, que o método da matriz

mostra-se bastante efetivo, principalmente para caminhões com 2 ou 3 eixos. (O'BRIEN, QUILLIGAN e KAROUMI, 2006).

O'Brien, González e Dowling (2010), propuseram um método para aumentar a precisão dos resultados previstos usando o sistema BWIM e reduzir as diferenças entre o peso real e o peso calculado. Para isto, o sinal dinâmico de deformação medido foi previamente filtrado para remover os componentes dinâmicos de altas frequências. Calculou-se uma linha de influência filtrada e esta foi usada para o cálculo dos pesos dos eixos, a partir de sinais, também filtrados, de reação da ponte à passagem de veículos desconhecidos. De acordo com os autores, para frequências bem baixas, menores que a frequência natural da ponte, a amplitude de incrementos dinâmicos (diferença entre amplitude total e estática) é muito menor que a associada à resposta estática. Também para estas frequências menores que a primeira frequência natural a resposta estática é linear. Ao filtrar o sinal abaixo da primeira frequência natural da ponte foi possível a remoção de muitos efeitos dinâmicos, mantendo a maioria dos componentes estáticos intactos.

Neste estudo foi implementado um modelo para o caminhão e feitas simulações computacionais. Para a primeira ponte em estudo, com vão de 25 m, simplesmente apoiada, a frequência natural obtida foi de 4,09 Hz. Decidiu-se filtrar os sinais, usando apenas os com frequência abaixo de 3 Hz. Três algoritmos foram desenvolvidos e testados. O primeiro deles foi o algoritmo de Moses, usando a LI analítica triangular. O segundo usou uma LI obtida a partir de 9 simulações de passagens do caminhão com três estados de carregamento (não carregado, com metade do carregamento e completamente carregado) e três velocidades ($0,8v$, v e $1,2v$, onde v é a velocidade média do tráfego). Foi feita uma média das 9 LI e esta foi então filtrada, eliminando as frequências superiores a 3 Hz. Para o terceiro algoritmo considerou-se o efeito da velocidade, que teve grande influência na dinâmica do carregamento. Para cada uma das 5 velocidades diferentes (20, 22, 24, 26 e 28 m/s) foi obtida uma LI filtrada usando o mesmo método que para a anterior, o que necessitou de um maior esforço para a calibração. Para avaliação da influência da velocidade foram simuladas 10 passagens do veículo alterando apenas a velocidade. A pesquisa mostra que a velocidade realmente influencia na precisão dos resultados, sendo que o pior dos algoritmos foi o primeiro. O terceiro se mostrou como o melhor dos três algoritmos, apresentando erros bem próximos a zero para o peso bruto do caminhão, porém pouco diferiu dos erros obtidos com o algoritmo 2. Já no caso de eixos individuais, o terceiro

algoritmo apresentou aumento da precisão para os casos de caminhões a velocidades elevadas, com erros de apenas 5%. O segundo algoritmo apresentou erros em torno de 5 a 10%. Para avaliar a influência do tamanho do vão na precisão dos algoritmos foi avaliada uma segunda ponte, com 15 m de vão e frequência natural de 5,66 Hz. Como para a ponte anterior, as LIs filtradas para o segundo e terceiro algoritmos resultaram em valores mais precisos para o peso dos eixos individuais que os valores obtidos com LIs do algoritmo padrão dos sistemas BWIM. Embora a implementação seja mais trabalhosa, considerar a LI correta para cada velocidade melhora os resultados. (O'BRIEN, GONZÁLEZ e DOWLING, 2010).

Também em 2010, Zhao e Uddin implementaram e explicaram detalhadamente um algoritmo BWIM, também usando o método da matriz a partir do algoritmo de Moses. Um segundo algoritmo foi implementado para o caso em que as vigas das pontes não sejam todas iguais, ou seja, possuírem EW diferente umas das outras. Para toda a ponte foi considerada apenas uma linha de influência. Tal análise reduz uma simplificação considerada no algoritmo de Moses, já que no caso de vigas iguais, a constante EW pode ser diretamente multiplicada pelo somatório das deformações medidas como apresentado da Equação (3.3). A consideração de EW diferentes implica na multiplicação desta constante por cada deformação resultando em cálculos mais extensos, porém seguindo a mesma lógica do método da matriz, já apresentado.

Uma ponte no Alabama foi instrumentada e a calibração realizada com veículos de 5 eixos para a obtenção das linhas de influência. Foi feita a média das LIs obtidas, excluindo uma com comportamento diferente das demais. A LI calculada foi próxima à teórica. Para os testes em campo decidiu-se adicionar em torno de 100 dados de deformação (correspondentes à medição de 0,2 s) antes da entrada e depois da saída do veículo na ponte de forma a cobrir uma possível abrupta mudança de velocidade na entrada ou saída da ponte. O erro percentual para eixos individuais foi inferior a 20% e para grupos de eixos e peso total menor que 6 e 7% respectivamente. (ZHAO e UDDIN, 2010).

Segundo Helmi, Bakht e Mufti (2014), um sistema BWIM foi desenvolvido recentemente em Connecticut, EUA, para prever PBT, peso por eixo e espaçamento de eixos de caminhões por meio de medições de deformações próximas ao meio do vão de uma ponte simplesmente apoiada. Neste sistema o método de cálculo das velocidades dos caminhões é feito apenas pelo sinal de deformação das

longarinas. As velocidades são calculadas por meio da segunda derivada das deformações específicas em relação ao tempo.

No Brasil, Carvalho Neto e Veloso (2014) estudaram a aplicação do método BWIM para pesagem em movimento de trens e caracterização do tráfego ferroviário sobre um viaduto de concreto armado da estrada de ferro Carajás no Maranhão. A estrutura da ponte foi modelada em elementos finitos, usando dois modelos para o comportamento do concreto armado, o modelo de Collins e Mitchell (1991) e o da NBR 6118 (2007). Foi implementado o algoritmo para determinação de dados da geometria do trem e das cargas, obtendo resultados bastante precisos. A linha de influência para a seção do meio do vão foi obtida, nesse caso, pelo programa de elementos finitos, a partir da passagem de uma carga unitária com velocidade de 1 m/s. No algoritmo, uma expressão matemática polinomial foi utilizada para melhor caracterizar a LI. As análises do viaduto em elementos finitos foram feitas para a passagem de duas locomotivas e quatro vagões nas velocidades de 1 m/s, 5, 10, 40, 60 e 80 km/h, obtendo-se valores de carga por eixo em cada velocidade. O erro médio para os pesos dos eixos para velocidades baixas, em torno de 10 km/h, foi inferior a 2% enquanto para altas velocidades, em torno de 80 km/h superou 15%. Depois da validação do modelo, a ponte foi instrumentada usando extensômetros nos encontros e no meio do vão da laje. Constatou-se que o modelo com o método de Collins e Mitchell apresentou resultados de peso bruto previstos muitos próximos aos medidos, enquanto o modelo da norma brasileira gerou erros em torno de 20%. Para o valor do peso bruto a alteração da velocidade pouco influenciou nos resultados.

Junges, Pinto e Miguel (2014) aplicaram sistema BWIM para avaliação da ponte sobre o Rio Lambari em Goiás. A linha de influência real foi obtida durante a calibração do sistema usando o programa SiWIM. Esta linha de influência foi comparada à linha de influência teórica, apresentando posteriormente um modelo com molas, chamada LI ajustada, que aproximou-se da LI real obtida pelo SiWIM. Com as 3 linhas de influência calculou-se então o momento fletor, obtendo-se valores de momento bem maiores para LI teórica que para a real, o que permitiria que cargas ainda maiores trafegassem sobre ponte em questão sem comprometimento da sua capacidade a flexão.

Ieng (2015) apresentou um algoritmo BWIM mais robusto para estimar a LI do viaduto de Millau, na França, usando o método de estimativa de máxima verossimilhança (MLE) ao invés do método dos mínimos quadrados. Ele apresenta um modelo matemático considerando

posições discretas da LI e o momento fletor nessas posições, comportamento que pode ser descrito pela Equação (3.33).

$$\mathbf{T}^T \cdot \mathbf{I} = \mathbf{M} \quad (3.33)$$

Onde: \mathbf{T} – matriz de Toeplitz (diagonais constantes) como define a Equação (3.34);

\mathbf{I} – vetor contendo as ordenadas da LI;

\mathbf{M} – vetor contendo os momentos fletores medidos;

p_i – são os pesos dos eixos

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & \dots & p_2 & 0 & \dots & p_n & 0 & \dots \\ 0 & p_1 & 0 & \dots & p_2 & 0 & \dots & p_n & \dots \\ 0 & \dots & p_1 & 0 & \dots & p_2 & 0 & \dots & p_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

No método proposto podem ser usados tantos sinais de deformação de eventos de calibração quantos desejados para encontrar a LI, diferente do método de O'Brien, Quilligan e Karoumi (2006) que utiliza somente o sinal de um caminhão de calibração. Neste método o ruído inerente das medições é considerado como um erro. Dessa forma os momentos medidos podem ser expressos como define a Equação (3.35), considerando que diferentes caminhões de calibração passem N vezes sobre a ponte.

$$M_{m,i} = M_i + e_i \quad (3.35)$$

Onde: $M_{m,i}$ é o momento fletor medido;

M_i é o vetor de momentos fletores;

e_i é uma variável aleatória normal que define o ruído.

Se as medições são independentes e igualmente distribuídas, então a probabilidade P de todo conjunto de amostras é o produto das probabilidades individuais, conforme Equação (3.36).

$$P = \prod_{i=1}^N \text{pdf}\left(\frac{e_i}{I}\right) \quad (3.36)$$

Onde: pdf - função de densidade de probabilidades.

Seguindo o princípio da máxima verossimilhança, maximizar P é equivalente a minimizar o negativo de seu logaritmo com relação a I_f . Usando a hipótese Gaussiana pode-se simplificar a equação logarítmica para a minimização por mínimos quadrados conforme exposto por Ieng (2015). A minimização desta equação se dá pela resolução da já conhecida equação apresentada em sua forma matricial na Equação (3.37).

$$\sum_{i=1}^N A_i A_i^T I = \sum_{i=1}^N A_i M_{m,i} = \mathbf{AA} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{am} \quad (3.37)$$

Onde: \mathbf{AA} é a matriz positiva definida contendo as informações dos pesos dos eixos dos caminhões de calibração;

\mathbf{am} é o vetor baseado nos pesos dos eixos e nas medições de momento fletor.

Foram usados 2 caminhões para calibração, um de 5 e outro de 3 eixos, totalizando 19 passagens dos veículos sobre a ponte. Ao invés de obter 19 LIs, como no método descrito por O'Brien et al (2006) desenvolvido a partir da minimização da equação erro obtida por mínimos quadrados, com o algoritmo desenvolvido, a partir das 19 passagens do veículo de calibração é obtida uma só LI, I_0 , adequada para prever todos sinais produzidos para qualquer caminhão que passe pelo viaduto. Os sinais previstos usando a LI obtida pelo novo algoritmo foram comparados ao sinal real medido no viaduto. Os resultados foram bem semelhantes e o erro obtido com o uso da I_0 foi inferior ao obtido usando I_{av} , a média dentre todas as 19 LIs obtidas separadamente.

3.3. Estudos envolvendo distribuição transversal de esforços

A maioria das abordagens descritas até então assume que toda a ponte comporta-se como uma só viga, ou que cada viga, com mesmo EW, possui exatamente o mesmo comportamento e a distribuição transversal das cargas é ignorada. Os resultados, no entanto, não se relacionam tão bem com o comportamento real da ponte. (ZHAO et al, 2014).

No estudo desenvolvido por Zhao et al (2014) foi avaliada, em uma ponte com 4 longarinas, a distribuição transversal das cargas das rodas e um comportamento bidimensional. Diferentes vigas podem possuir também diferentes propriedades, caso a seção não seja

exatamente a mesma. Assim, cada viga tem sua própria linha de influência. O algoritmo de Moses foi modificado, incluindo a distribuição transversal das cargas das rodas e foi apresentado um método para calcular os pesos por eixos usando as LIs de cada viga.

A ponte escolhida para este estudo situava-se na Rota 78 Leste em Graysville, Alabama. Possuía 3 vãos iguais, totalizando 38,4 m, e apresentava pavimento bastante uniforme. Os caminhões usados na calibração possuíam 5 eixos. Neste estudo foi usado um sistema FAD BWIM. Os sensores FAD foram fixados sob a laje da ponte para detectar a velocidade dos veículos, número de eixos e espaçamento entre eles. Os sensores para a pesagem foram colocados próximos ao meio do vão de cada longarina, perto da transversina.

O momento fletor experimental foi calculado a partir da soma das deformações de todas as vigas em cada instante k multiplicada pela constante EW das vigas. Essas deformações são leituras dos extensômetros para deformações longitudinais na superfície inferior das vigas longitudinais. A equação dada em (2.3) considera que todas as vigas da ponte tenham as mesmas dimensões. Caso as vigas não fossem todas iguais entre si, o valor EW não poderia ser tirado da somatória, já que W é diferente, a menos que fossem calculados os momentos em cada viga separadamente, necessitando, então, a obtenção de linhas de influência diferentes para cada viga. (ZHAO et al, 2014).

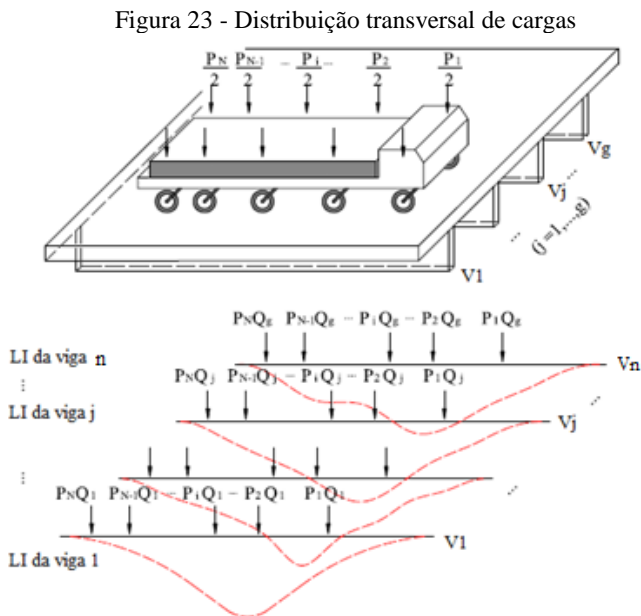
Zhao et al (2014) desenvolveram um método para cálculo das linhas de influência das diferentes vigas usando fatores de distribuição de carga transversal. Estes fatores representam uma parcela da carga móvel total que é transmitida pelo tabuleiro para cada viga, na direção transversal ao sentido do fluxo. Assim, cada viga absorveria uma porcentagem do esforço total. Cabe lembrar que a AASHTO (2012) demonstra que os coeficientes de distribuição transversal das cargas são diferentes para o cálculo do momento fletor e do esforço cortante e ainda dependem da posição ao longo da direção da rodovia. Isto quer dizer que um processo mais preciso consideraria que diferentes partes da ponte apresentariam diferentes fatores de distribuição transversal para cada viga. No entanto isto requereria um processo de calibração mais complexo, bem como aumento do tempo de processamento do algoritmo. Como a maioria das pontes com vigas e laje apresenta distribuição lateral do carregamento semelhante na região do meio do vão, para simplicidade da implementação, o estudo contou com o uso dos fatores de distribuição referentes à região de obtenção do sinal de deformação obtido no meio do vão de cada viga.

O fator de distribuição Q para cada viga foi calculado a partir da razão entre a deformação individual da viga e o somatório da deformação de todas as vigas num dado instante k , como na equação (3.38). Zhao et al inicialmente calcularam este fator para os instantes com os 50 maiores valores de deformação da viga mais solicitada. O coeficiente de distribuição transversal final adotado pra cada viga foi tomado como a média entre estes 50 valores. Os autores não indicaram um motivo pelo qual utilizaram 50 valores e não um número superior ou inferior.

$$Q_{j,k} = \frac{\varepsilon_{j,k}}{\sum_{j=1}^n \varepsilon_{j,k}} \quad (3.38)$$

Onde: n é o número de vigas

A Figura 23 ilustra a distribuição transversal dos pesos das rodas do caminhão de calibração, cujos pesos dos eixos, P_i , são conhecidos. Q_j é este fator de distribuição transversal em cada viga.



Fonte: Zhao et al (2014).

Com esses valores, Zhao et al (2014) aplicaram os conceitos de Moses no desenvolvimento de um algoritmo que levasse em conta a distribuição transversal das cargas e as possíveis diferenças nas vigas que compõem a ponte.

O momento fletor em cada viga foi calculado pelas Equações (3.39) e (3.40):

$$M_k^j = E_j W_j \varepsilon_{j,k}^t \quad (3.39)$$

Onde: M_k^j é o momento fletor da viga j no instante k;
 E_j é o módulo de elasticidade da viga j;
 W_j é módulo de resistência da seção de cada viga;
 $\varepsilon_{j,k}^t$ é o sinal previsto (teórico) para o tempo k na viga j.

$$M_k^j = \sum_{i=1}^n P_i Q_j I_{j,(k-Ci)} \quad (3.40)$$

Onde: $P_i Q_j$ é a carga distribuída para a viga j;
 $I_{j,(k-Ci)}$ é a ordenada da LI sob a carga de eixo que foi distribuída para a viga j.

Igualando as duas equações calcula-se o sinal de deformação teórico ou previsto para a viga j no instante k.

$$\varepsilon_{j,k}^t = \frac{1}{E_j W_j} \sum_{i=1}^n P_i Q_j I_{j,(k-Ci)} \quad (3.41)$$

Exemplificando para o caso de 3 eixos, na viga 1 e instante k este valor seria:

$$\varepsilon_{j,k}^t = \frac{1}{E_j W_j} (P_1 Q_1 I_{1,k} + P_2 Q_1 I_{1,(k-C2)} + P_3 Q_1 I_{1,(k-C3)}) \quad (3.42)$$

Como os valores da deformação teórica e medida ($\varepsilon_{j,k}^m$) não são exatamente iguais, as ordenadas da linha de influência são encontradas pela minimização da função erro que pode ser escrita como.

$$\varphi = \sum_{k=1}^K (\varepsilon_{j,k}^m - \varepsilon_{j,k}^t)^2 \quad (3.43)$$

A função erro deve ser expandida e sua derivada igualada a zero para que o erro seja mínimo, obtendo a seguinte equação para a viga 1:

$$\begin{aligned} \partial\varphi / \partial I_{1,R} = & 2 \left[\frac{1}{E_1 W_1} \varepsilon_{1,R}^m - \frac{1}{(E_1 W_1)^2} (P_1 Q_1 I_{1,R} + P_2 Q_1 I_{1,(R-C_2)} \right. \\ & \left. + P_3 Q_1 I_{1,(R-C_3)}) \right] (-P_1 Q_1) \\ & + 2 \left[\frac{1}{E_1 W_1} \varepsilon_{1,(R+C_2)}^m - \frac{1}{(E_1 W_1)^2} (P_1 Q_1 I_{1,(R+C_2)} \right. \\ & \left. + P_2 Q_1 I_{1,R} + P_3 Q_1 I_{1,(R+C_2-C_3)}) \right] (-P_2 Q_1) \\ & + 2 \left[\frac{1}{E_1 W_1} \varepsilon_{1,R+C_3}^m - \frac{1}{(E_1 W_1)^2} (P_1 Q_1 I_{1,R+C_3} \right. \\ & \left. + P_2 Q_1 I_{1,(R+C_3-C_2)} + P_3 Q_1 I_{1,R}) \right] (-P_3 Q_1) \end{aligned} \quad (3.44)$$

Que na forma matricial corresponde a:

$$\mathbf{W} \cdot \mathbf{I} = \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad (3.45)$$

E que pode ser resolvida invertendo a matriz \mathbf{W} , como:

$$\mathbf{I} = \mathbf{W}^{-1} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad (3.46)$$

Onde, como o apresentado no item 2.4.3 o vetor \mathbf{I} contém as desejadas ordenadas da linha de influência, o vetor $\boldsymbol{\varepsilon}$ depende dos deslocamentos medidos e das cargas nos eixos já transversalmente distribuídas, sendo $\varepsilon_{1,R} = E_1 W_1 (P_1 Q_1 \varepsilon_{1,R}^m + P_2 Q_1 \varepsilon_{1,R+C_2}^m + P_3 Q_1 \varepsilon_{1,R+C_3}^m)$. Assim como a matriz \mathbf{A} , \mathbf{W} é uma matriz simétrica e esparsa, cujos elementos não nulos estão nas mesmas posições que as já apresentadas e seus valores são os mesmos, contendo, porém, no lugar de apenas o peso do eixo P_i , o peso do eixo distribuído transversalmente para cada viga $P_i Q_j$, sendo:

$$\begin{aligned} W_{R,R} &= \sum_{i=1}^n (P_i Q_i)^2 \\ W_{R,R+(C_s-C_t)} &= (P_s Q_j)(P_t Q_j) \end{aligned} \quad (3.47)$$

Sendo: $R+(C_s-C_t) \leq K-C_3$; $R=1, \dots, K$; $s > t$; $s = 1, \dots, n$; $t = 1, \dots, N$.

Desta forma pode ser obtida uma linha de influência para cada passagem do veículo de calibração. As linhas de influência de cada viga foram obtidas e comparadas com a linha de influência teórica. O sinal previsto foi comparado ao sinal medido. As LIs das vigas abaixo da via em que trafegava o veículo se mostraram semelhantes à LI teórica. A LI da viga interna, sob a outra pista também apresentou formato semelhantes às outras. A LI e o sinal da viga na extremidade da ponte na outra pista, com bastante efeito dinâmico, não apresentou um formato definido.

Como conclusão, os autores indicam que a LI de cada viga deve ser obtida pela passagem do veículo de calibração na pista que passa sobre essas vigas. O sinal previsto e o calculado a partir dos pesos dos eixos e das LIs obtidas pela passagem do caminhão sobre a pista correspondente apresentaram valores muito semelhantes.

Com os valores das linhas de influência de cada viga e os coeficientes de distribuição transversal, pode-se calcular o peso dos eixos, vetor \mathbf{P} , dos caminhões desconhecidos resolvendo as já conhecidas equações:

$$M_k = \sum_{j=1}^n (EW)_j \varepsilon_{j,k}^t = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N (P_i \times Q_j \times I_{j,(k-ci)}) \quad (3.48)$$

Onde N é o número de eixos do caminhão e n é o número de longarinas da ponte. A primeira parte corresponde ao momento fletor total da ponte experimental, previsto para o instante k e a segunda parte corresponde ao momento fletor teórico no instante k . A Equação (3.48) pode ser escrita na forma matricial, como a Equação (3.49):

$$\mathbf{EW}^T \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_k^t = \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{IL} \cdot \mathbf{P} \quad (3.49)$$

Onde:

$$\mathbf{EW} = \begin{Bmatrix} EW_1 \\ EW_2 \\ \vdots \\ EW_g \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_k^t = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{1,k}^t \\ \varepsilon_{2,k}^t \\ \vdots \\ \varepsilon_{g,k}^t \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_g \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{Bmatrix} \quad (3.50)$$

$$\mathbf{IL} = \begin{bmatrix} I_{1,k} & I_{1,(k-C2)} & \cdots & I_{1,(k-CN)} \\ I_{2,k} & I_{2,(k-C2)} & \cdots & I_{2,(k-CN)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{g,k} & I_{g,(k-C2)} & \cdots & I_{g,(k-CN)} \end{bmatrix} = [\{I\}_k \{I\}_{k-C2} \cdots \{I\}_{k-CN}]$$

Assim pode-se encontrar uma resposta teórica da ponte no instante k que será comparada à resposta medida. O valor dos pesos dos eixos é encontrado a partir da minimização da função erro entre essas respostas da ponte.

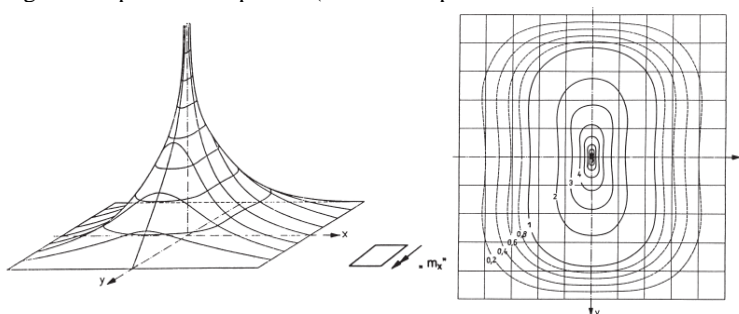
Os pesos dos eixos foram calculados, inicialmente, pelo método demonstrado, usando as linhas de influência e coeficientes de distribuição transversal de todas as vigas. Depois foram calculados usando apenas 3 vigas, eliminando a viga da extremidade da outra pista. Uma terceira análise foi realizada considerando apenas as duas vigas sob a pista em que passou o caminhão.

Os pesos de eixos separados apresentaram erros superiores que para o peso total e peso por grupos de eixos, sendo este último o que apresentou menores erros. Os melhores resultados foram obtidos usando-se as 4 vigas. Usando-se 3 vigas os resultados foram muito próximos aos anteriores, o que comprovou que a viga da extremidade oposta, que recebeu bem menos carga, pouco influenciou na obtenção dos pesos dos veículos. Ao usar apenas as 2 vigas abaixo da pista analisada, os erros aumentaram cerca de 2% em relação aos outros casos, mostrando que a viga 3, no meio da ponte, sob a outra pista, ainda recebeu uma parcela significativa do carregamento e que deve ser considerada para obtenção dos pesos e para o cálculo do momento fletor solicitante. O algoritmo, que possui comportamento mais realístico, por considerar a distribuição transversal das cargas das rodas, gerando carregamentos e LIs diferentes em cada viga, foi considerado efetivo e preciso, podendo ser aplicado para identificação de pesos dos veículos. (ZHAO et al, 2014).

No caso de pontes em lajes ou em decks ortotrópicos essa transversalidade deveria ser levada em conta, já que não há como considerar a ponte toda como uma só viga. O estudo efetuado por Quilligan (2003) abordou o uso de algoritmos 2D e o desenvolvimento de superfícies de influência, como mostra a Figura 24.

Tendo determinada a superfície de influência do momento fletor, a resposta M em um dado ponto depende do peso de cada roda e da ordenada da superfície de influência sob cada roda.

Figura 24 - Superfície de influência do momento fletor no centro de uma placa retangular simplesmente apoiada (em visão espacial e coordenadas isométricas).



Fonte: Quilligan (2003).

Usando os mesmos conceitos definidos por Moses, o algoritmo 2D criado segue uma rotina de otimização que minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre resultados medidos e teóricos, cujo primeiro somatório percorre todas as leituras e o segundo percorre todos os sensores.

Quilligan (2003) estudou o comportamento de 3 pontes. Para cada uma foi usado um algoritmo 1D e depois 2D. Para a primeira ponte, cuja calibração foi feita com veículos de 2 e 3 eixos, ao usar o algoritmo 2D proposto os resultados mostraram-se significativamente mais precisos. Na segunda, na qual foram usados veículos de calibração de 7 eixos, os efeitos dinâmicos apresentados foram responsáveis por uma redistribuição dos pesos ao longo do veículo, fato notado pelo peso total bruto ser bastante preciso enquanto o peso de eixos separados apresentou erros notavelmente maiores. Na ponte composta por vigas e lajes constatou-se que o uso de um algoritmo 2D não melhorou os resultados. (QUILLIGAN et al, 2003).

O estudo da distribuição transversal das cargas, principalmente em pontes formadas por vigas e lajes, ainda foi pouco desenvolvido e merece atenção por representar um comportamento bidimensional mais próximo ao real, o que influencia a precisão dos resultados da pesagem dos veículos.

3.4. Conclusões

O sistema BWIM teve grande desenvolvimento nos últimos anos. Apresenta várias vantagens em relação a outros sistemas de pesagem em movimento, principalmente por poder ser usado tanto para pesagem dos

veículos quanto para avaliação da estrutura da ponte. O grande número de informações, devido à medida das deformações durante toda a passagem do veículo sobre a ponte, é outra vantagem, pois possibilita um ganho de precisão nos resultados. Além disso, a implementação dos sistemas FAD garante o aumento da durabilidade do sistema e torna mais fácil sua instalação.

O algoritmo de Moses, introduzido no fim dos anos 70, é a base de vários sistemas BWIM até hoje. Neste algoritmo o momento teórico e o momento medido são aproximados por uma função erro que deve ser minimizada. O algoritmo faz uso do conceito de linhas de influência, porém ao utilizar a linha de influência teórica, obtida por análise estrutural, os resultados obtidos para os pesos dos eixos não são precisos. Usando veículos com pesos conhecidos e os sinais de deformação é possível determinar a linha de influência real da ponte numa etapa chamada de calibração. Com o método da matriz, as ordenadas da linha de influência são facilmente encontradas.

Vários estudos foram desenvolvidos visando aumentar a precisão dos resultados. Notou-se que em pontes muito longas os resultados encontrados são menos precisos e que o ideal é a aplicação do sistema em pontes com vãos em torno de 15 m. A rugosidade do pavimento e as condições de acesso à ponte são bastante importantes, pois influenciam nos efeitos dinâmicos sobre o sinal de deformação. A velocidade é, considerada constante, tanto na etapa de calibração quanto para a pesagem, e embora se saiba que esta pode variar durante o período em que o caminhão cruza a ponte, esta variação geralmente não é considerada relevante. A velocidade, no entanto, pode influenciar nos resultados, sendo que velocidades maiores geram resultados menos precisos, devido aos maiores efeitos dinâmicos, principalmente quando na etapa de calibração a velocidade de passagem for muito inferior à velocidade característica do tráfego. Os erros para altas velocidades podem ser diminuídos gerando linhas de influência, durante a calibração, em velocidades mais altas. Como uma das causas para a perda de precisão é o ruído no sinal, este sinal pode ser filtrado, a uma frequência inferior à frequência natural da ponte, permitindo a remoção de grande parte dos efeitos dinâmicos. Ressalta-se ainda que a partir do algoritmo de Moses, usando para a minimização do erro entre momentos o método dos mínimos quadrados, é obtida uma linha de influência para cada passagem do veículo de calibração. A LI final é obtida pela LI média. Ao usar outros métodos para descrever a diferença entre momentos fletores, pode-se gerar uma linha de influência a partir de

vários sinais de deformação, tornando o sistema mais preciso por ser menos sensível aos ruídos nos sinais.

Cabe lembrar ainda que a consideração do comportamento bidimensional das cargas não é comum em pontes com vigas e lajes, gerando para toda a ponte uma só linha de influência. A consideração da distribuição transversal da carga, atribuindo um carregamento diferente para cada viga, possibilita a introdução de vigas de seção transversal e/ou estado de degradação diferentes, o que resultará em linhas de influência diferentes para cada viga. Ao levar em conta essa transversalidade das cargas, os resultados tornam-se mais precisos.

Com as linhas de influência reais das pontes obtidas pelo sistema BWIM, pode ser obtido o momento solicitante real e assim avaliar a segurança estrutural da ponte em questão.

4. METODOLOGIA

Neste trabalho é avaliada a influência da distribuição transversal do carregamento para cada longarina na obtenção da linha de influência a partir de dados de deformação de cada viga obtidos pelos extensômetros do sistema BWIM instalados sob a estrutura de pontes.

Para tanto, os dados de uma ponte previamente instrumentada com o sistema BWIM foram analisados. Dois algoritmos para a obtenção das linhas de influência foram implementados, sendo adaptados para as características da ponte, bem como dos veículos utilizados para calibração do sistema BWIM.

O primeiro algoritmo foi desenvolvido a partir do algoritmo de Moses e, implementado no programa Matlab. Com os dados de deformação das longarinas, obtém-se uma única linha de influência para o sistema, considerando toda a ponte como uma só viga equivalente. Para este algoritmo, considera-se que todas as vigas da ponte possuem o mesmo comportamento estrutural.

Um segundo algoritmo foi desenvolvido de forma a considerar a distribuição transversal dos esforços. Assim, considera-se que uma parcela diferente da carga das rodas dos caminhões é distribuída para cada longarina da ponte. Para cada uma das vigas, que neste caso podem também apresentar geometrias diferentes umas das outras ou diferentes níveis de degradação, é obtido um coeficiente de distribuição transversal da carga e uma linha de influência própria.

As linhas de influência obtidas por ambos os algoritmos foram comparadas às linhas de influência teóricas.

A distribuição dos esforços entre as vigas da ponte, que pode ser medida pela deformação de cada viga na passagem do caminhão, também foi avaliada e comparada com alguns modelos teóricos de distribuição transversal.

A ponte avaliada é descrita no item a seguir. Os caminhões usados para calibração, os sinais obtidos em cada sensor instalado e demais cálculos necessários são também detalhados ao longo deste capítulo.

4.1. Descrição da ponte em estudo: Ponte Lambari

Os conceitos estudados e algoritmos implementados foram aplicados em uma ponte brasileira que atende aos critérios necessários para aplicação do sistema BWIM.

Esta ponte é localizada no km 135 da BR-153 no município de Uruaçu no estado de Goiás. Ela foi construída sobre o Rio Lambari e possui 22,50 m de comprimento. O vão entre pilares é de 15 m. A Figura 25 mostra algumas imagens da ponte em questão.

Figura 25 - Fotos da ponte sobre o Rio Lambari



A BR-153, chamada Rodovia Belém-Brasília, é um dos mais importantes corredores viários brasileiros, por onde escoa grande parte da produção agrícola e industrial. O trecho entre os municípios de Uruaçu e Porangatu, ambos em Goiás, possui um significativo tráfego de caminhões pesados. Dentre as pontes desse corredor, a ponte sobre o Rio Lambari foi inicialmente escolhida por apresentar características adequadas ao sistema BWIM, fácil acesso pra instalação do sistema e inspeção e também por apresentar várias características de degradação como corrosão de armaduras e fissuras em elementos.

A ponte é formada por quatro longarinas apoiadas sobre pilares, com balanços nas duas extremidades como mostram as Figuras 26 e 27. Há ainda 5 transversinas, uma bem no meio do vão, 2 sobre os pilares e duas nas extremidades. As vigas principais são vigas T com 125 cm de altura e alma com 30 cm. A largura da mesa foi determinada de acordo

com cálculos da NB1 (1960), norma para projeto e execução de estruturas de concreto armado, como o caso da ponte Lambari, vigente na época da construção da ponte. Logo largura efetiva considerada foi de 190 cm. A laje possui 15 cm de espessura. Estima-se que a resistência característica do concreto seja de 15 MPa, comum nas estruturas com mais de 30 anos, como esta ponte. A Figura 28 mostra a seção transversal das vigas da ponte.

Figura 26 - Corte lateral da ponte (dimensões em cm)

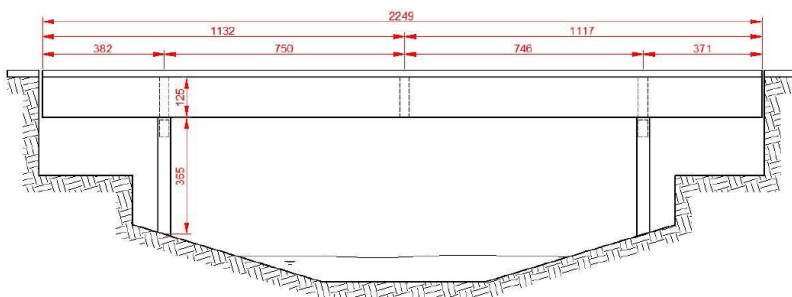


Figura 27 - Seção transversal da superestrutura da ponte (dimensões em cm)

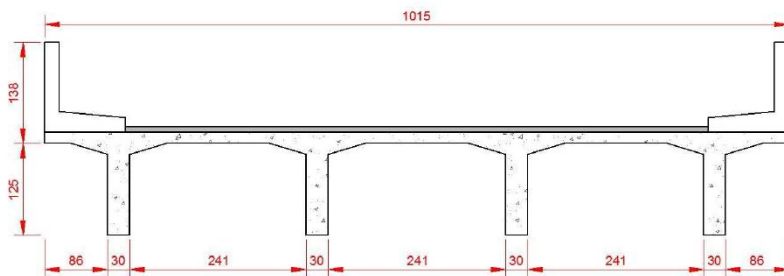
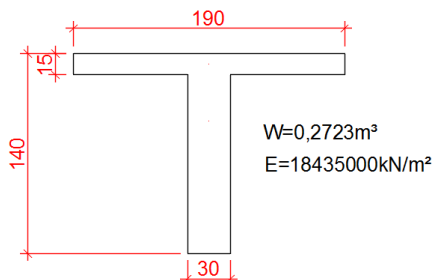


Figura 28 - Seção transversal das longarinas



Dois transdutores foram instalados nas longarinas, totalizando 8 sensores de pesagem. A média dos sinais de cada par de sensor foi utilizada. Em cada pista também foram usados dois sensores de detecção de eixos (FADs) para medir velocidade e distância entre eixos. A instalação foi realizada em novembro de 2013, monitorando-se a ponte por 42 dias. A Figura 29 apresenta algumas imagens do sistema instalado no local.

A posição dos sensores na ponte está ilustrada na Figura 30. Os sensores 9, 10, 11 e 12 são detectores de eixos. No sentido Porangatu estão os sensores 9 e 10, espaçados por 3,97 m. Os sensores 11 e 12 estão no sentido Uruaçu, distantes 4,03 m um do outro.

Os sensores de pesagem não foram instalados exatamente no meio do vão da ponte, devido à existência de uma transversina. As vigas foram numeradas da seguinte forma: viga V1 na extremidade da ponte no sentido Uruaçu, viga V2, mais ao centro, também sob essa pista, e na sequência vigas V3 e V4, sob a pista que segue para Porangatu, sendo V4 a viga da extremidade da ponte. Os sensores 2 e 7 estão sob a V1, 5 e 4 na V2, 3 e 6 na V3 e 1 e 8 na V4.

Figura 29 - Instalação do sistema BWIM

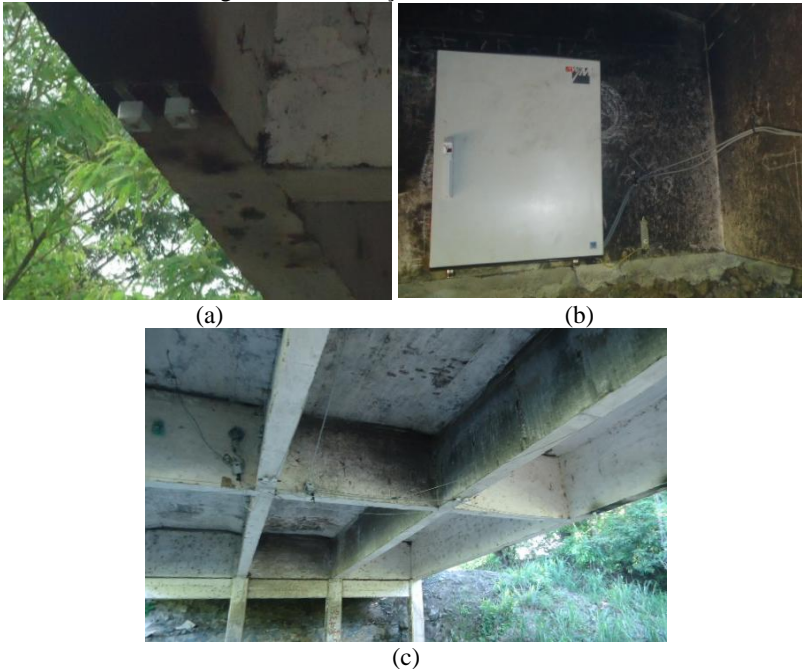
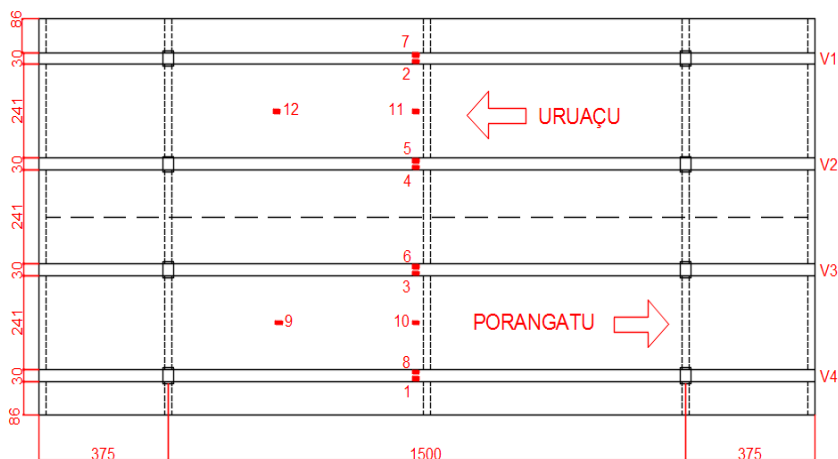


Figura 30 - Posição dos sensores na ponte Lambari



4.2. Eventos de calibração

Para a etapa de calibração do sistema BWIM instalado na ponte de Uruaçu foram usados dois caminhões diferentes: um de 3 eixos e um de 5 eixos. Os pesos de cada eixo e o espaçamento entre os eixos dos veículos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Características dos veículos de calibração em Uruaçu

Veículos		Caminhão 1	Caminhão 2
Peso dos eixos (kN)	A1	46,70	51,80
	A2	10,865	53,49
	A3	10,865	87,46
	A4	-	87,46
	A5	-	87,56
	PBT	264,0	368,00
Espaçamento entre eixos (m)	A1-A2	4,60	4,27
	A2-A3	1,29	3,47
	A3-A4	-	1,23
	A4-A5	-	1,23

Em novembro de 2013 foram feitas várias passagens dos veículos sobre a ponte do rio Lambari. Algumas passagens foram excluídas por apresentarem múltipla presença de veículos nos sinais de deformação,

ou qualquer falha de leitura. Foram escolhidas 8 passagens do veículo de 3 eixos e 6 do veículo de 5 eixos, todos no sentido Sul, seguindo para Uruaçu. As leituras obtidas nas passagens seguindo a Porangatu, no sentido norte, resultaram em sinais de deformação bastante incomuns, com maiores deformações e grande oscilação. Foi observado um desnível entre a estrutura e o aterro da estrada, gerando um impacto na entrada da ponte.

A Figura 31 ilustra esses comportamentos relatados. São apresentados os valores do momento fletor na seção medida por análise estática, e a média das 8 deformações obtidas com o caminhão de 3 eixos nos dois sentidos. Para esta análise apenas o vão biapoiado da ponte foi avaliado. Nota-se que no sentido Uruaçu (sul) as deformações tem comportamento similar ao momento esperado na região do meio do vão, apresentando deformações negativas no início do vão devido ao efeito dos balanços. No sentido Porangatu, no entanto, a figura mostra deformações com comportamento bem diferente do momento calculado. O mesmo ocorreu para os veículos de 5 eixos. Resolveu-se assim, para esta ponte, usar somente as medições realizadas com os caminhões no sentido Uruaçu.

Figura 31 - Comparação entre momentos e deformações medidas

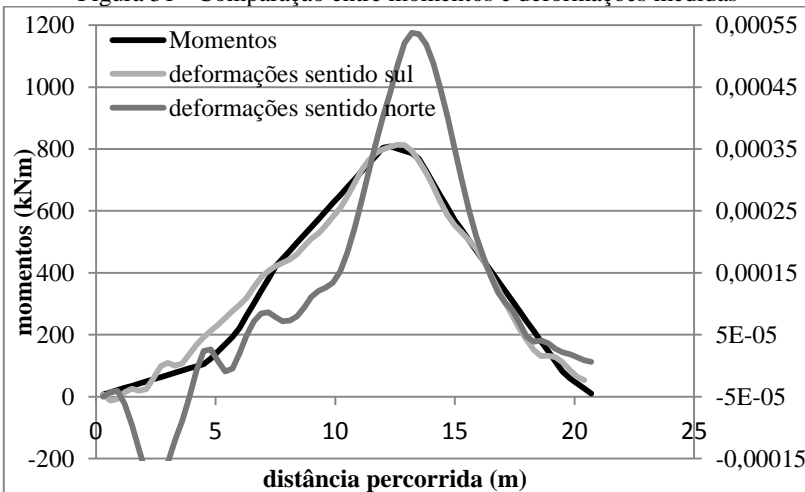


Tabela 6 – Velocidades dos veículos e erro nas distâncias entre eixos calculadas

Evento	Velocidade (m/s)	A 1-2	A 2-3	A 3-4	A 4-5	E 1-2	E 2-3	E 3-4	E 4-5
1	24,28	4,60	1,28	-	-	0,00%	-0,78%	-	-
2	24,18	4,63	1,28	-	-	0,65%	-0,78%	-	-
3	23,99	4,64	1,31	-	-	0,87%	1,55%	-	-
4	23,99	4,69	1,27	-	-	1,96%	-1,55%	-	-
5	23,99	4,64	1,27	-	-	0,87%	-1,55%	-	-
6	23,99	4,64	1,31	-	-	0,87%	1,55%	-	-
7	18,26	4,64	1,28	-	-	0,87%	-0,78%	-	-
8	18,42	4,64	1,26	-	-	0,87%	-2,33%	-	-
9	25,48	4,23	3,48	1,24	1,24	-0,94%	0,29%	0,81%	0,81%
10	24,57	4,22	3,50	1,25	1,25	-1,17%	0,86%	1,63%	1,63%
11	25,48	4,28	3,48	1,24	1,29	0,23%	0,29%	0,81%	4,88%
12	16,91	4,23	3,50	1,26	1,22	-0,94%	0,86%	2,44%	-0,81%
13	17,94	4,21	3,50	1,26	1,19	-1,41%	0,86%	2,44%	-3,25%
14	17,11	4,21	3,51	1,24	1,24	-1,41%	1,15%	0,81%	0,81%

Os eventos usados estão apresentados na Tabela 6 sendo que o 1º ao 8º evento correspondem a passagens do caminhão de 3 eixos, enquanto o 9º ao 14º evento são referentes a passagens do caminhão de 5 eixos. As deformações foram obtidas aproximadamente a cada 0,002 segundos, dado que a frequência de aquisição do sistema foi de 512 Hz. A Tabela 6 apresenta também a velocidade de passagem do caminhão e os espaçamentos calculados entre eixos, além do respectivo erro no cálculo desse espaçamento calculado em relação ao espaçamento real.

A velocidade do veículo de calibração em cada passagem foi calculada usando o procedimento descrito no item 3.1.4, de acordo com o relatório do projeto WAVE de 2001. Usando os sinais de deformação dos sensores FAD, identificou-se o número de eixos do caminhão passante e o instante de cada pico em cada sensor. A Figura 32 apresenta um exemplo deste sinal. O caminhão de 3 eixos passou primeiro pelo sensor 11, instalado praticamente no meio do vão da ponte, e depois pelo sensor 12, instalado 4,03 m a frente. Os picos ocorreram nos instantes dados na Tabela 7. Com esses valores calculou-se a velocidade, assumida como constante durante a passagem do caminhão, apresentada na Tabela 6 como exemplificam os cálculos seguintes.

Figura 32 - Sinal de deformação de sensores FAD obtido com a passagem de um caminhão de 3 eixos no evento 1

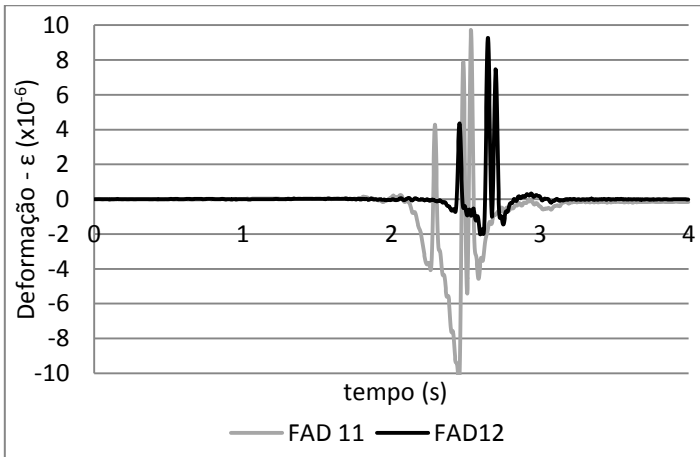


Tabela 7 - Instantes em que ocorrem os picos de deformação nos sensores FAD no evento 1

senal 11 (s)	senal 12(s)
2,293	2,459
2,484	2,648
2,535	2,701

$$v = \frac{L_{FAD}[\text{sentido Uruaçu}]}{t_1[\text{sensor12}] - t_1[\text{sensor11}]} = \frac{4,03}{2,459 - 2,293} = 24,276\text{m/s}$$

$$v = \frac{L_{FAD}[\text{sentido Uruaçu}]}{t_2[\text{sensor12}] - t_2[\text{sensor11}]} = \frac{4,03}{2,701 - 2,535} = 24,276\text{m/s}$$

A partir desta velocidade e usando os picos de apenas um sinal pode-se calcular a distância entre eixos como:

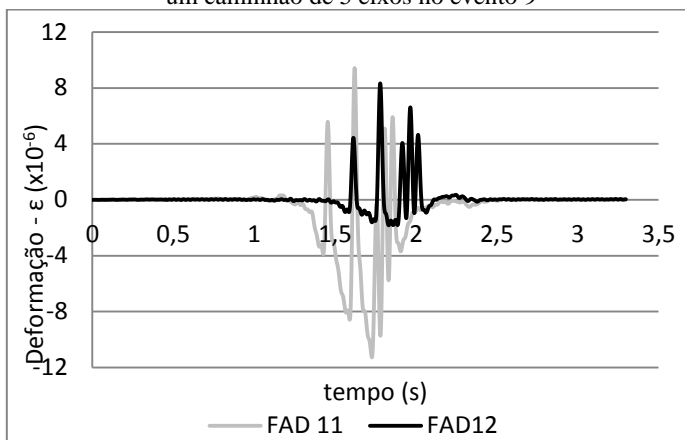
$$C_{1,2} = v(t_2 - t_1) = 24,276(2,648 - 2,459) = 4,60\text{m}$$

$$C_{2,3} = v(t_3 - t_2) = 24,276(2,701 - 2,648) = 1,31\text{m}$$

Comparando o espaçamento entre eixos calculados para cada evento com os dados reais da Tabela 5 obtiveram-se os erros apresentados na Tabela 6.

Este mesmo procedimento foi realizado para cada evento de calibração. A Figura 33 apresenta o sinal de deformação do evento 9 obtido pelos sensores FAD com o caminhão de 5 eixos, evidenciados pelos 5 picos bastante nítidos do sinal.

Figura 33 - Sinal de deformação de sensores FAD obtido com a passagem de um caminhão de 5 eixos no evento 9



Diferentemente dos sinais obtidos pelos sensores FAD, os sensores nas vigas adquiriram sinais de deformação como indicam as Figuras 34 e 35, referentes à passagem de caminhões com 3 e 5 eixos respectivamente. Não se verifica a ocorrência de picos no sinal durante a passagem do caminhão sobre os sensores, não sendo, portanto, possível identificar a quantidade de eixos do caminhão.

Em todos os sinais ocorreu deformação positiva e elevada junto ao meio do vão, ou seja, houve alongamento, caracterizando tração na parte inferior da viga nessa região. Por outro lado, foi registrada deformação negativa quando da entrada do caminhão na ponte e antes da saída, ou seja, houve encurtamento do material, caracterizando tensões de compressão na parte inferior da viga na região dos balanços. Verificou-se, ainda, deformação nula quando o caminhão se encontrava próximo aos apoios sobre os pilares. Verificam-se também efeitos dinâmicos visíveis, principalmente na entrada da ponte. Estes foram, em geral, maiores nos sinais dos veículos de 5 eixos.

O maior sinal foi obtido no sensor 4, correspondente a viga 2. A segunda maior deformação foi obtida na viga 1, seguida pela viga 3, estas muito próximas. Na viga 4, na extremidade oposta, os sinais foram bem inferiores aos das vigas anteriores. Com a passagem do veículo de 5 eixos, mais pesado, as medidas de deformação obtidas são superiores às obtidas com a passagem do caminhão de 3 eixos.

Figura 34 - Deformações nas vigas no evento 1

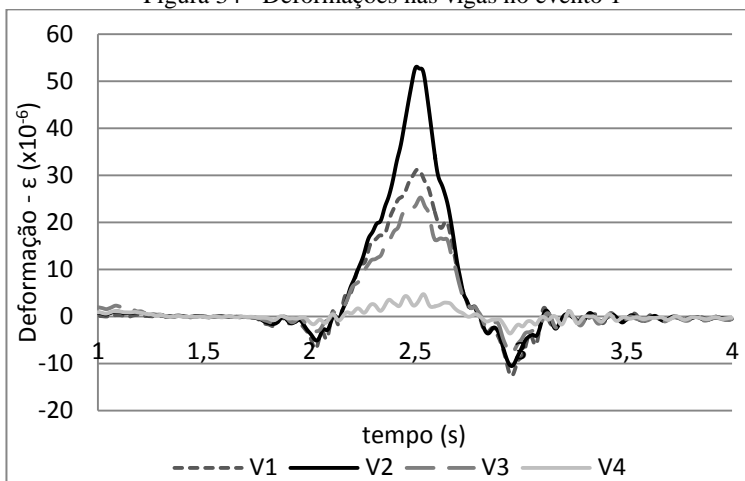
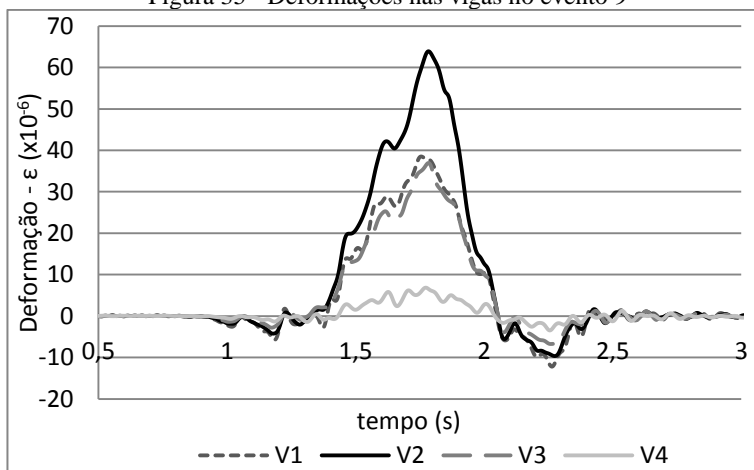


Figura 35 - Deformações nas vigas no evento 9



O número total de medidas variou com a velocidade do caminhão. Em geral, a passagem do veículo sobre a ponte durou pouco mais de 1,5 segundos, resultando em torno de 750 a 800 medidas no trecho da ponte. Contudo, ressalta-se aqui que, como visto nas figuras anteriores, os sensores de deformação não começam a captar os sinais apenas quando a primeira roda do caminhão toca a ponte, tendo no ponto inicial da ponte, a primeira leitura. Quando o caminhão realmente

entra na ponte, já há k leituras medidas. De mesma forma, após a saída do caminhão da ponte, leituras de deformação continuam sendo gravadas. O valor de K , que na literatura é o número de leituras de deformação do instante em que o primeiro eixo toca a ponte até o último eixo sair dela, não é bem definido na prática, variando bastante para cada evento. O valor usado para o K foi, então, o número total de leituras medidas, variando entre os eventos de calibração escolhidos de 1244 a 2128 valores.

A posição do caminhão na ponte com relação aos sinais de deformação foi obtida a partir dos dados dos sensores FAD. Utilizou-se o instante em que o primeiro eixo do caminhão atingiu o primeiro sensor FAD como o instante para relacionar todos os eventos ao calcular a linha de influência média do sistema.

4.3. Desenvolvimento dos algoritmos

4.3.1. Algoritmo 1: Algoritmo de Moses

Inicialmente foi implementado, no software Matlab, o algoritmo de Moses, conforme apresentado no item 3.1.2 deste trabalho.

O procedimento detalhado para o desenvolvimento e testes dos algoritmos está apresentado no final deste trabalho no APÊNDICE.

Basicamente há arquivos de entrada de dados para cada evento de calibração, que leem as informações do arquivo texto com as medidas de deformação. Há também um arquivo de entrada de dados geral com informações dos veículos de calibração e características da ponte, como módulo de elasticidade do material. Lembra-se aqui que para a ponte sobre o rio Lambari há 2 sensores por viga, portanto é feita a média entre os sinais de deformação de cada viga.

No algoritmo principal, cria-se então um vetor de deformações, no qual são somadas as deformações de cada viga e multiplicadas por uma constante de transformação de Volts para deformação, neste caso 16.10^{-6} . Usando EW constante e os pesos dos eixos encontra-se o vetor **M** de Moses. A partir de outra rotina, usando apenas os pesos dos eixos, calcula-se a matriz **A**. Com o vetor **M** e a matriz **A** definidos, encontra-se o vetor **I**, com as ordenadas da linha de influência da ponte para cada evento, a partir da inversão da matriz **A**.

Para que a linha de influência represente toda a ponte, ela não pode ser baseada em apenas um evento de calibração, mas sim na média

de todos os eventos. A média de todas as LIs só é possível após regularização do tamanho do vetor \mathbf{I} , pegando pontos comuns para todos os sinais. Neste caso a cada 5 cm é interpolado um valor de ordenada da LI. Assim todos os vetores passam a ter o mesmo número de componentes correspondentes à mesma distância percorrida.

A partir desta linha de influência média, o próximo passo é o cálculo do peso dos veículos. Usa-se então uma rotina que deixa a LI média com número de pontos compatíveis às leituras de deformação da ponte com a passagem de um veículo qualquer, com velocidade qualquer. Depois disso cria-se a matriz \mathbf{IL} correspondente às ordenadas da LI em cada eixo e obtêm-se os pesos dos eixos a partir da Equação (3.31). Somam-se esses pesos, obtendo o peso bruto total do caminhão e então são calculados os erros.

4.3.2. Algoritmo 2: Consideração da distribuição transversal

Em seguida foi implementado, usando Matlab, um algoritmo BWIM que considera a distribuição transversal do carregamento das rodas para cada viga da ponte, conforme apresentado por Zhao et al (2014). Desta forma cada longarina pode apresentar um comportamento diferente, evidenciado pela diferença nas linhas de influência.

O procedimento detalhado para desenvolvimento do algoritmo, bem como os testes feitos estão no segundo item do APÊNDICE.

Foram utilizadas as mesmas rotinas de entrada de dados já descritas, tanto específicos de cada evento de calibração quanto gerais da ponte e dos veículos. Neste caso para cada viga há um valor de EW. Para todas as vigas, inicialmente, foi usado o mesmo valor EW.

A deformação para este algoritmo é uma matriz de deformações com número de linhas igual à quantidade de leituras de deformação e colunas igual ao número de vigas. Deve-se também converter o sinal de Volt para deformação.

Para cálculo do coeficiente de distribuição transversal das cargas, segue-se o estudo de Zhao et al (2014). Encontra-se, inicialmente, o valor da maior leitura dentre todas as deformações e definem-se os m maiores valores de deformação. São obtidos os m valores correspondentes nas demais vigas. Para cada um dos m instantes são somadas as deformações correspondentes de todas as vigas. Tomando estes valores de deformação e dividindo pela deformação total, em cada

instante se obtém um coeficiente de distribuição transversal, representado pela letra Q , como na Equação (3.38). Dentre os m valores de Q é feita a média e encontrado o coeficiente de distribuição transversal pra cada viga.

Cada viga é avaliada separadamente. De forma semelhante ao algoritmo anterior obtém-se uma matriz \mathbf{M} a partir das deformações, coeficiente Q e EW de cada viga, bem como os pesos dos eixos, com número de colunas iguais ao número de vigas e número de linhas igual a $K-C_N$. Então é calculada a matriz \mathbf{A} para cada viga, considerando que a parcela de carga que vai para cada viga. Ou seja, em todos os lugares da matriz \mathbf{A} , que no algoritmo anterior recebiam o valor P_i , foi usado neste algoritmo o valor $P_i Q_j$. Invertendo todas as matrizes \mathbf{A} e multiplicando cada uma pela respectiva coluna da matriz \mathbf{M} obtém-se os vetores correspondentes às ordenadas da linha de influência em cada viga, para cada evento.

De forma análoga ao algoritmo 1 anterior usa-se uma rotina para regularização do tamanho de todas as LIs para ser feita a média por viga.

A partir destas linhas de influência médias pode-se encontrar os pesos dos eixos dos veículos. O cálculo é mais complexo que no primeiro algoritmo, visto que há uma LI para cada longarina. Para resolver o problema criam-se n matrizes de linhas de influência (onde n é o número de vigas), com as ordenadas da LI em cada eixo do caminhão. Usando essas matrizes e o vetor com os coeficientes de distribuição transversal forma-se uma matriz F . Essa matriz multiplicada pelos pesos por eixos resulta em um vetor m , que depende dos coeficientes de distribuição transversal, dessa matriz de linhas de influência, dos coeficientes do vetor EW e das deformações, ϵ , de cada viga. A resolução do sistema depende da sequência de cálculos descritos em Zhao et al (2014) e reproduzidos no APÊNDICE. Caso uma das vigas tenha deformações consideravelmente irrelevantes, pode-se redistribuir a carga que iria para ela para as outras vigas e retirá-la da análise, como também explicado no apêndice.

Esta distribuição dos esforços será comparada com métodos teóricos, como Courbon, Leonhardt, Fauchard, AASHTO e o método apresentado por Li e Chen (2011). Será discutida então a forma ideal de considerá-la nestes algoritmos BWIM, e a importância dessa consideração para este tipo de análise.

4.4. Suavização das linhas de influência

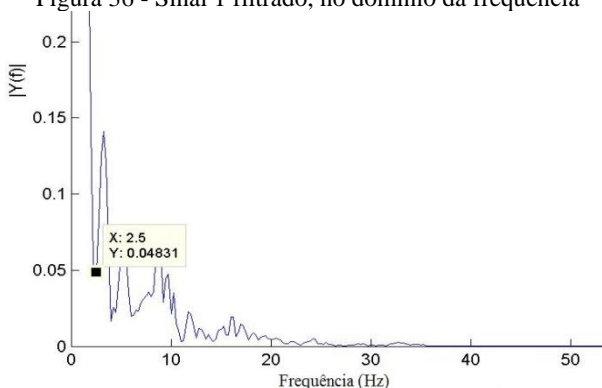
A influência no cálculo de PBT após a utilização de um processo de suavização do formato de linhas de influência será avaliada. No presente estudo, propõe-se que o processo de filtragem seja feito sobre os sinais de deformação, já que é neste sinal que se encontram possíveis valores excessivos e ruídos que poderão prejudicar a precisão da LI medida. Este processo foi utilizado por O'Brien, González e Dowling (2010) que filtraram a linha de influência calculada a partir dos sinais de deformação obtidos. Eles escolheram uma frequência abaixo da frequência natural da ponte, no caso 3 Hz, e removeram das LIs as frequências superiores a esta.

Neste estudo optou-se pela utilização de um filtro Gaussiano. Outros filtros poderiam ser testados, mas acredita-se que o objetivo de se avaliar a influência deste processo já poderá ser observado com a utilização deste filtro.

Para definição da frequência de filtragem os sinais de deformação foram inicialmente transformados para o domínio da frequência, a partir da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform). Assim obtêm-se picos em frequências diferentes, que correspondem às amplitudes ligadas aos cossenos da série de Fourier em n harmônicos.

Ao plotar este espectro de amplitudes, a frequência máxima atingida é metade da frequência em que as leituras são obtidas, nesse caso 256 Hz. Inicialmente há um pico bem elevado que dá o formato do sinal de deformação. Não há muitas amplitudes associadas a frequências maiores que 30 Hz, como mostra a Figura 36.

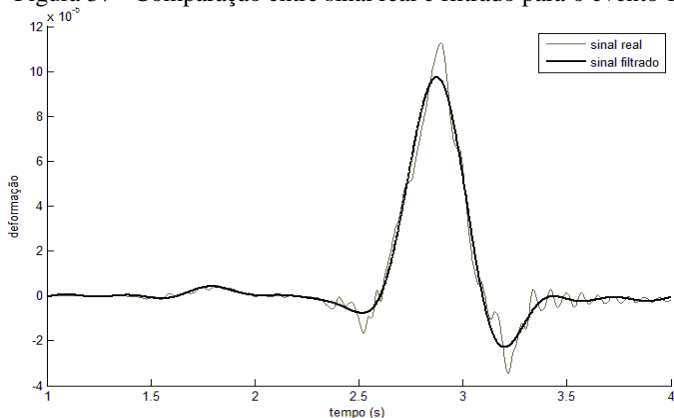
Figura 36 - Sinal 1 filtrado, no domínio da frequência



A partir deste espectro de frequência pode ser definida a frequência de corte. Avaliando visualmente todos os sinais chegou-se a conclusão de que é viável filtrá-los a uma frequência de 2 Hz, mantendo o primeiro pico e filtrando todos os demais.

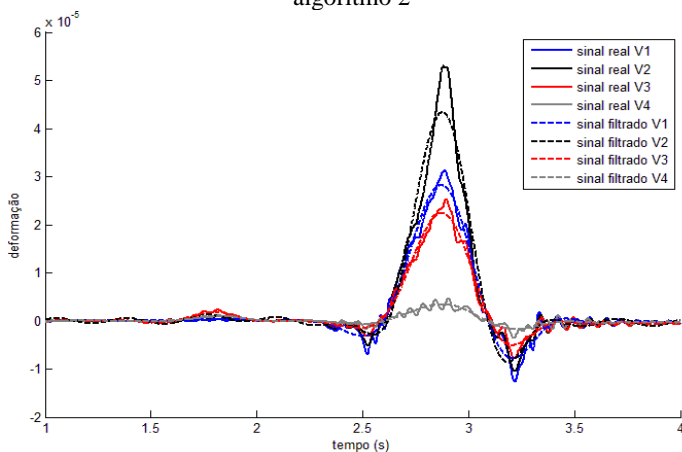
Voltando ao domínio do tempo, usando a inversa da transformada de Fourier, obtém-se o sinal filtrado como o apresentado na Figura 37. Nota-se que o filtro tende a reduzir o pico do sinal.

Figura 37 - Comparação entre sinal real e filtrado para o evento 1



Para o segundo algoritmo, é feito o mesmo procedimento para cada viga individualmente. A Figura 38 apresenta os sinais de deformação já filtrados.

Figura 38 – Comparação entre sinais reais e filtrados do evento 1 para o algoritmo 2



A partir dos sinais filtrados são obtidas as linhas de influência e então obtida a LI média, mesmo procedimento adotado anteriormente. Os pesos dos eixos são calculados e os erros do peso bruto total comparados aos resultados tanto do primeiro quanto do segundo. Para o caso específico do algoritmo 2, é avaliada a alteração que ocorre nos coeficiente de distribuição transversal da carga para cada viga após passar o filtro sobre o sinal.

A comparação entre resultados das LIs filtradas e as originais é feita no capítulo seguinte. Ressalta-se aqui que o comportamento para os caminhões de 5 eixos é praticamente o mesmo e que não são necessárias adaptações nos algoritmos nesse caso.

5. RESULTADOS

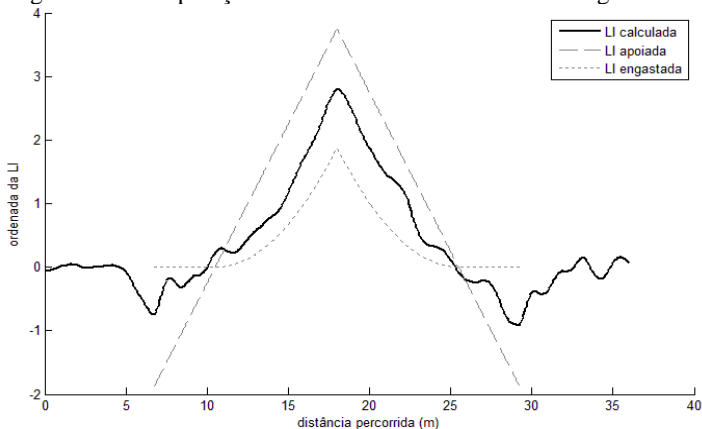
Os algoritmos implementados foram testados usando os 14 sinais de deformação obtidos na etapa de calibração do sistema BWIM instalado na ponte sobre o Rio Lambari na BR 153 em Goiás. Estes sinais são a resposta da ponte à passagem de caminhões com dimensões e pesos dos eixos conhecidos. Há 8 sinais obtidos com a passagem do caminhão de 3 eixos e mais 6 obtidos com o veículo de 5 eixos, todas seguindo para o sul, em sentido a Uruaçu, já que nesta pista o pavimento estava em melhores condições, permitindo aplicação mais correta do sistema BWIM.

Para ambos os algoritmos foram obtidas as linhas de influência já apresentadas no capítulo anterior e que serão aqui discutidas. A partir destas linhas de influência podem-se calcular os pesos dos eixos e o peso total do veículo, que serão comparados aos pesos reais obtidos por pesagem estática, obtendo medidas de erro aqui apresentadas e discutidas. As técnicas para suavização da linha de influência, também serão discutidas nesse capítulo.

5.1. Análise das Linhas de Influência

A linha de influência média obtida com o primeiro algoritmo para a ponte Lambari é apresentada na Figura 39 a seguir comparada à LI teórica apoiada e à LI teórica engastada.

Figura 39 - Comparação entre as linhas de influência – Algoritmo 1



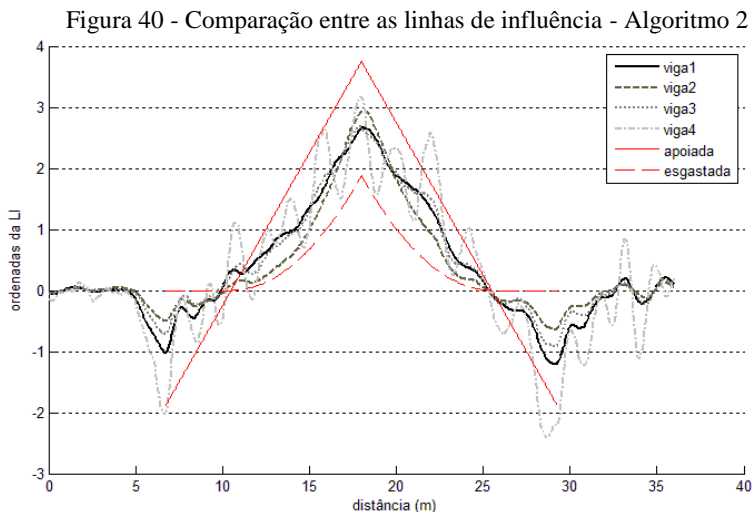
O formato da linha de influência medida (em preto) é como o esperado, com um pico sobre os sensores e as partes negativas nas regiões dos balanços, semelhante ao que ocorre na linha de influência teórica para uma ponte apoiada com balanços. Esta parte negativa é mais suave que na linha de influência teórica, pois não há a redução abrupta dos esforços assim que termina a ponte, ela não é simplesmente apoiada já que há uma interação entre a estrutura e a pista logo na entrada e saída da ponte.

O valor máximo da linha de influência teórica para esta viga é 3,75 no meio do vão. O valor máximo da linha de influência média obtida pelo algoritmo 1, também no meio do vão, foi 2,80. Caso os apoios da ponte fossem considerados totalmente engastados, o valor máximo da linha de influência seria 1,875.

Esta LI será denominada LI total para efeito desta discussão.

Como na literatura estudada, a linha de influência total se encontra entre o modelo simplesmente apoiado e o completamente engastado. Os valores obtidos são bastante coerentes e indicam que os esforços que ocorrem na realidade são em torno de 30% menores que os usados em projeto, obtidos a partir da LI teórica apoiada.

As LIs obtidas para cada viga a partir dos resultados do segundo algoritmo estão apresentadas na Figura 40, juntamente com as LIs para condição simplesmente apoiada e engastada.



Da mesma forma que a LI total, o formato de cada linha de influência é bastante coerente, apresentando um pico no meio do vão e valores negativos na região do balanço. Como os veículos de calibração trafegaram na direção sul, os dados de deformação na V4, na extremidade leste da ponte, apresentaram valores reduzidos sendo mais influenciados pelos ruídos de sinal, o que ocasionou as oscilações observadas na LI resultante. Desta forma, a contribuição desta viga foi excluída em algumas análises de pesos.

As ordenadas máximas das linhas de influência de cada viga são bastante próximas, com a viga 2 apresentando o maior valor de 2,94, no meio do vão. As vigas 1 e 3, na extremidade sob a pista e a viga interna da outra pista respectivamente, apresentaram valores máximos de linha de influência iguais a 2,66 e 2,68, respectivamente. A diferença maior entre estas LIs se encontra na região do balanço, onde a viga da extremidade, V1, apresenta maiores valores absolutos. As LIs obtidas encontra-se entre as LIs teóricas, evidenciando um comportamento estrutural entre simplesmente apoiado e engastado.

Ao comparar as LI de cada viga com a LI total, obtida pelo algoritmo 1, percebe-se que a LI da viga mais solicitada (V2) possui ordenada máxima 5% maior que a LI total. Por outro lado, as LIs das vigas V1 e V3, menos carregadas, apresentam ordenada máxima em torno de 5% menor que a LI total. Este resultado indica que a LI total pode ser considerada como uma média entre as LIs da extremidade e do meio do vão e que esta diferença é bastante pequena.

Para análise estrutural, no caso analisado, em que todas as vigas possuem o mesmo módulo de elasticidade e geometria, seria mais viável considerar uma única LI para toda a ponte. A utilização de LI individual para cada viga se justificaria quando o valor de EW diferisse entre elas.

Em termos de pesagem em movimento, quando o objetivo não é a análise da estrutura, mas sim a pesagem dos caminhões, esta consideração de LIs diferentes pode ser importante e será avaliada no próximo item.

5.2. Pesagem dos veículos

A partir das linhas de influência obtidas na primeira etapa de cada um dos algoritmos descritos e discutidas no item anterior, foram calculados os pesos dos eixos e peso total dos caminhões, usando os mesmos 14 eventos de calibração, para os quais o valor do peso real é conhecido, sendo, portanto, possível o cálculo do erro da medição.

Os pesos dos eixos dos caminhões foram calculados a partir do procedimento descrito em 3.1.5.

Para o primeiro algoritmo, usando a LI total apresentada na Figura 39, são obtidos os erros apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 1 em relação ao peso real (em %)

Evento	A1	A2	A3	A4	A5	PBT
1	0,34	-16,20	8,28			-3,20
2	4,32	-19,35	14,06			-1,41
3	-12,21	-1,33	-1,83			-3,46
4	-8,77	-4,93	0,27			-3,47
5	-6,67	-4,67	-0,62			-3,36
6	-2,73	-10,06	1,24			-4,11
7	23,22	-12,25	-1,18			-1,42
8	7,31	-5,35	-7,66			-4,06
9	11,27	-3,83	15,63	-34,79	23,13	1,30
10	9,46	-5,83	4,13	15,76	-21,25	-0,53
11	11,08	-9,85	24,21	-29,91	16,75	1,30
12	-3,56	10,99	-33,02	22,78	-16,51	-3,39
13	-5,30	16,28	-34,95	14,72	-7,86	-2,60
14	-0,09	12,45	-35,04	17,67	-9,02	-2,53
Média						2,58

Nota-se que para o peso bruto total o erro pode ser considerado pequeno, somente ultrapassando 4% em dois eventos. Para os pesos dos eixos individuais, no entanto, o erro chega a ultrapassar 30% em alguns casos. Com o veículo de 3 eixos os erros calculados foram inferiores aos obtidos com a análise das passagens do caminhão de 5 eixos.

A Tabela 9 apresenta os erros obtidos com o segundo algoritmo com m igual a 50, como no estudo de Zhao et al, 2004. Inicialmente foram utilizadas as linhas de influência das 4 vigas, ou seja, incluindo a da V4, que apresentou grande oscilação.

Tabela 9 – Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 2, $m=50$, considerando todas as vigas, em relação ao peso real (em %)

Evento	A1	A2	A3	A4	A5	GVW
1	0,70	-16,41	8,52			-3,12
2	4,66	-22,74	17,76			-1,23
3	-12,50	-4,31	1,35			-3,43
4	-9,46	-7,26	2,84			-3,50
5	-6,54	-7,80	2,83			-3,20
6	-2,05	-13,51	5,04			-3,85
7	23,83	-12,34	-1,01			-1,28
8	7,48	-6,96	-5,59			-3,84
9	10,78	-4,23	14,15	-32,74	21,69	0,97
10	9,21	-6,79	3,09	14,28	-18,00	-0,64
11	10,74	-10,46	22,61	-27,71	15,24	0,92
12	-3,69	10,36	-34,15	23,22	-15,32	-3,46
13	-5,32	15,82	-35,43	15,73	-8,69	-2,78
14	-0,36	11,94	-35,76	17,03	-7,14	-2,58
Média						2,49

A Tabela 9 indica que o erro no peso bruto total para 7 de 8 eventos do caminhão de 3 eixos diminuiu em relação aos resultados obtidos com o primeiro algoritmo, apresentados na Tabela 8. Por outro lado, a mesma conclusão não se aplica aos erros obtidos para o veículo de 5 eixos.

O maior erro observado foi de 3,85%, inferior ao maior erro obtido para o algoritmo 1. Entretanto as médias entre os erros absolutos obtidos para o PBT pelos algoritmo 1 e 2 se encontram próximas, com os valores 2,58% e 2,49% respectivamente. Conclui-se, portanto, que houve uma pequena melhora, porém não muito significativa. Em relação aos pesos dos eixos individuais, os resultados não melhoraram com o uso de LI diferentes para cada viga.

A Tabela 10 apresenta os erros obtidos sem a consideração da LI da V4.

Tabela 10 – Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 2, desconsiderando a última viga, em relação ao peso real (em %)

Evento	A1	A2	A3	A4	A5	GVW
1	1,66	-16,70	9,61			-2,62
2	5,22	-22,44	18,32			-0,77
3	-12,11	-3,80	1,70			-3,00
4	-9,12	-6,15	2,80			-3,00
5	-6,15	-7,22	3,19			-2,75
6	-1,24	-13,39	5,86			-3,32
7	25,77	-13,33	0,79			-0,60
8	8,93	-7,59	-4,33			-3,33
9	9,57	-3,35	18,26	-37,00	23,21	1,31
10	7,86	-5,91	5,30	13,83	-18,89	-0,41
11	9,64	-9,87	26,93	-31,48	16,15	1,23
12	-4,97	11,74	-34,20	23,94	-15,70	-3,22
13	-6,85	17,68	-36,42	17,33	-9,17	-2,49
14	-1,77	13,57	-36,79	18,91	-7,91	-2,34
Média						2,17

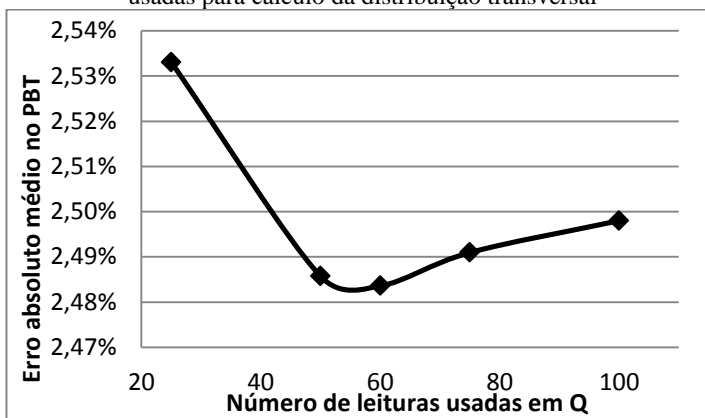
Neste caso, comparando com o uso de todas as longarinas, os erros no PBT foram menores. O erro absoluto médio reduziu de 2,49% para 2,17%. Quando comparados aos resultados do algoritmo 1, nota-se que para o peso bruto total 13 de 14 leituras apresentaram resultados melhores enquanto no evento 9 o valor é praticamente o mesmo. Por outro lado, os erros por eixo aumentaram.

Os resultados apresentados até então utilizaram para cálculo dos coeficientes de distribuição transversal os 50 maiores valores de deformação de cada viga, como realizado em Zhao et al (2014). No entanto estes autores não apresentaram um motivo para o uso deste número específico de medidas. Decidiu-se então verificar a influência do número de leituras para o cálculo do coeficiente transversal no erro do PBT. Foram, então, calculados os coeficientes Q a partir dos 25, 60, 75 e 100 maiores dados de deformação. A distância que estas leituras cobrem varia com a velocidade, mas correspondem a algo em torno de 1,2, 2,8, 3,5 e 4,6 m respectivamente.

Os mesmos cálculos foram feitos considerando estas novas quantidades de leituras, desde a obtenção da LI até o cálculo dos pesos.

Foram utilizadas inicialmente as LI das 4 vigas. Para esta análise avaliou-se a média do erro absoluto em relação ao peso bruto total apenas. A Figura 41 apresenta o erro absoluto encontrado para cada número de leituras m .

Figura 41 - Erro médio absoluto no PBT para diferentes números de leituras usadas para cálculo da distribuição transversal



Com 100 leituras, uma parcela muito grande do vão é usada para o cálculo do Q, abrangendo trechos de comportamentos diferentes que não podem ser agrupados. No meio do vão os esforços distribuem-se diferentemente do que acontece nas regiões mais próximas aos apoios. Como apresentado anteriormente no item 3.3, um processo mais preciso consideraria que diferentes partes da ponte apresentariam diferentes fatores de distribuição transversal para cada viga, o que tornaria o algoritmo mais complexo e a calibração muito mais minuciosa. Por outro lado, com apenas 25 leituras, não há cobertura suficiente para que os dados daquele trecho sejam extrapolados para a ponte toda.

Pode-se perceber que o uso de 60 leituras levou a resultados mais precisos, porém muito próximos aos com 50 leituras. Numa velocidade de 24 m/s, este número de leituras cobre 2,81 m que corresponde a 19% do vão, na parte mais desfavorável. As 50 leituras utilizadas por Zhao et al (2014) também cobrem aproximadamente 20% do vão. Conclui-se, portanto, que a quantidade de leituras necessárias para calcular um coeficiente de distribuição transversal que melhor represente a ponte e leve a resultados de peso bruto total mais precisos não pode ser um valor fixo, mas sim correspondentes a aproximadamente 20% do vão da

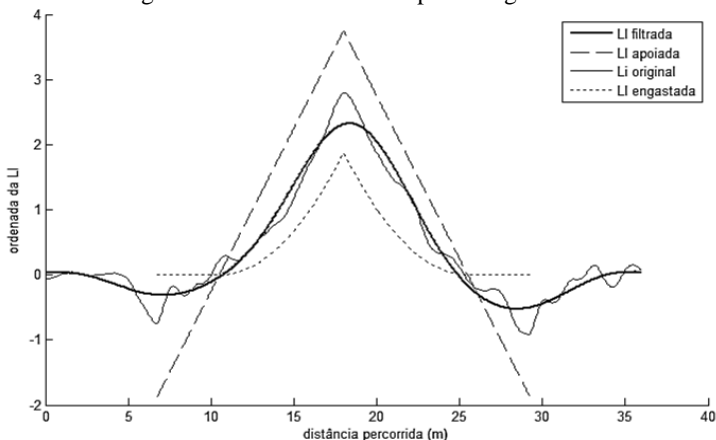
ponte, obtidas no meio do vão. Este número depende também da velocidade do caminhão e da frequência de leitura do sistema.

5.3. Avaliação das LIs após filtragem

Os 14 sinais de calibração passaram inicialmente pelo filtro de Gauss, removendo as frequências maiores que 2 Hz. Para cada um dos sinais filtrados calculou-se uma linha de influência sendo obtida depois a média entre elas. Esta linha de influência média é apresentada na Figura 42 junto à LI calculada original e as LIs teóricas da ponte apoiada e engastada.

A partir destes sinais filtrados foram obtidas as linhas de influência e posteriormente a LI média, como era feito anteriormente. Os pesos dos eixos foram calculados e os erros do peso bruto total comparados aos resultados do primeiro algoritmo. As linhas de influência médias obtidas foram comparadas com a LI média obtida no algoritmo 1 sem filtragem.

Figura 42 - LI média filtrada para o algoritmo 1



A LI filtrada é bem mais suave que a LI calculada inicialmente. A sua ordenada máxima é em torno de 15% menor que a da LI original. De mesmo modo, também se encontra entre o modelo simplesmente apoiado e completamente engastado.

Usando esta linha de influência para cálculo dos pesos dos veículos de peso conhecido obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 11.

Nesta tabela nota-se que claramente que a filtragem do sinal não foi positiva para o peso de eixos separados, que anteriormente não passavam de 35% de erro, e que neste caso chegaram a 272% para veículos de 5 eixos, por exemplo. Para o peso bruto total, no entanto, houve redução em todos os eventos. Anteriormente o erro máximo do PBT ultrapassava 4% e usando a LI filtrada o maior erro observado foi de 2,83%. O erro absoluto médio sobre o PBT é somente 1,65%.

Tabela 11- Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 1 em relação ao peso real a partir da LI filtrada (em %)

Evento	A1	A2	A3	A4	A5	PBT
1	10,60	-35,02	27,72			-1,13
2	8,87	-28,16	24,25			-0,04
3	-4,89	-13,67	11,24			-1,87
4	-1,83	-15,92	12,40			-1,77
5	-3,91	-10,98	7,26			-2,23
6	6,14	-26,03	17,90			-2,26
7	38,33	-35,82	22,70			1,38
8	8,90	-8,32	-2,05			-2,69
9	3,74	23,43	-191,34	272,31	-105,08	1,11
10	10,70	-7,02	25,55	-19,62	-2,10	0,42
11	6,55	8,87	-116,86	179,05	-69,78	1,38
12	-17,86	42,96	-187,81	221,87	-86,76	-2,83
13	-18,80	50,16	-219,43	259,15	-96,73	-2,10
14	-17,50	50,33	-220,59	248,42	-84,93	-1,91
Média						1,65

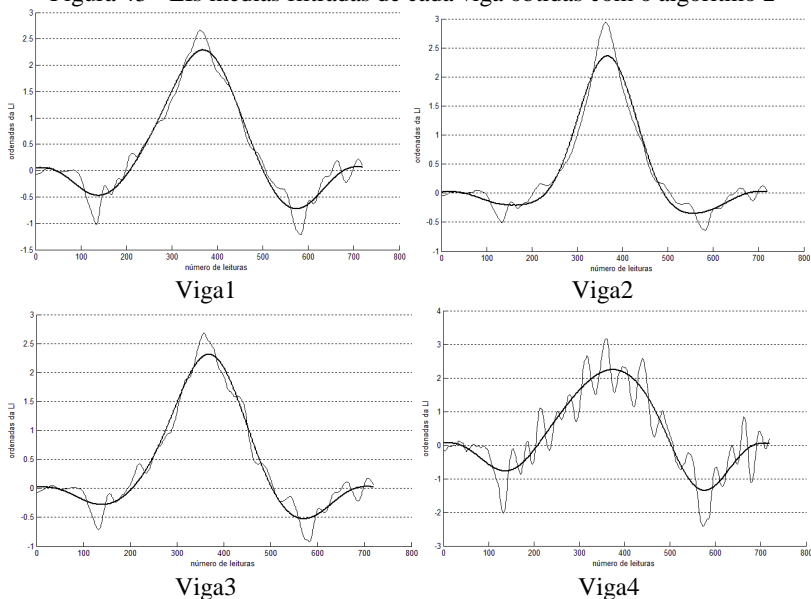
Estes resultados ainda mostram uma linha de influência mais genérica para todos os tipos de caminhões, podendo-se considerar que esta linha filtrada representa melhor a ponte em questão. Tendo como ordenada máxima o valor 2,38, esta LI filtrada tem pico 36% menor que na LI apoiada e 27% maior que na LI engastada.

Esse processo foi aplicado também ao algoritmo 2. Os sinais de deformação de cada viga individualmente foram filtrados e então foi aplicado o algoritmo 2. Os pesos foram obtidos e os respectivos erros calculados em relação aos pesos reais. Avaliaram-se as diferenças na

média dos erros absolutos no peso bruto total. As linhas de influência médias de cada viga foram comparadas as do algoritmo 2 sem filtro.

A utilização do algoritmo 2 nos sinais de deformação filtrados gerou as LIs apresentadas na Figura 43, onde são comparadas estas LIs às originais. Nestas análises foram usadas para cálculo do coeficiente de distribuição transversal 60 leituras, já que no item anterior esse número foi definido como o que resulta em erros menores.

Figura 43 - LIs médias filtradas de cada viga obtidas com o algoritmo 2

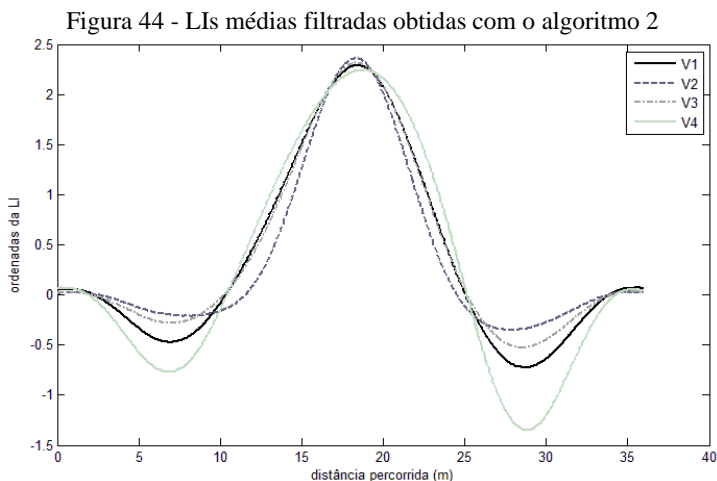


Percebe-se com clareza a redução do efeito dinâmico na viga 4, ao considerar o sinal filtrado. Nota-se também, como verificado com o algoritmo 1, que os picos são reduzidos.

A Figura 44 apresenta as LIs das 4 vigas juntas. Pode-se notar que o mesmo comportamento anteriormente observado sem a filtragem se mantém, ou seja, a LI da viga 2 com maior ordenada (2,24), seguida das vigas 1 (2,09) e 3 (2,07), ficando a LI da viga 4, de forma mais coerente após a filtragem, com a menor ordenada (1,95).

Estes valores de maior ordenada são inferiores ao obtido com o algoritmo 1 (2,36). Sendo assim, diferentemente do que ocorreu no caso das linhas de influência não filtradas, em que desconsiderando a transversalidade das cargas a LI obtida é equivalente à média das LIs

interna e externa, os valores obtidos para as ordenadas das LIs filtradas individuais, foram menores que a LI total para a ponte. Este efeito pode ter sido ocasionado por uma perda de precisão do filtro. Quando aplicado na soma das deformações (algoritmo 1) esta perda, ou ao menos redução do pico, ocorre apenas uma vez. Quando o filtro é passado em cada sinal individualmente, há redução do pico em todas as 4 vigas.



Os erros nos pesos foram também calculados com estas LIs filtradas individuais sendo apresentados na Tabela 12. Como também aconteceu sem a filtragem, a consideração da distribuição transversal das cargas no cálculo dos pesos resultou em pesos brutos totais ainda menores. O erro absoluto médio sobre o PBT foi reduzido a 1,56%. Para os eixos individuais, no caso do caminhão de 3 eixos estes erros chegam quase a 40%. Para os caminhões de 5 eixos, em alguns deles o peso encontrado é mais de 3 vezes maior que o peso real, enquanto para outro eixo fica mais de 2 vezes menor, ou seja, negativos. Novamente percebe-se que ao usar as linhas de influências das 4 vigas o erro no peso bruto total reduz e os erros nos pesos dos eixos aumentam quando comparados ao caso de usar apenas uma LI para todo o sistema.

Tabela 12 - Erros nos pesos estimados com o Algoritmo 2 em relação ao peso real a partir das LIs filtradas (em %)

Evento	A1	A2	A3	A4	A5	PBT
1	10,27	-35,02	27,59			-1,24
2	10,72	-33,35	29,68			0,38
3	-2,98	-19,13	16,87			-1,45
4	-0,37	-21,12	17,72			-1,47
5	-2,31	-16,22	12,61			-1,89
6	7,96	-31,32	23,36			-1,87
7	39,97	-37,27	24,12			1,66
8	10,86	-12,33	2,24			-2,23
9	-1,37	37,36	-278,28	394,02	-153,21	1,06
10	7,85	-2,91	1,89	9,40	-10,66	0,40
11	2,47	18,90	-187,85	280,52	-111,21	1,02
12	-21,26	49,38	-228,46	277,46	-107,86	-2,98
13	-20,98	56,42	-262,63	321,26	-122,36	-2,26
14	-20,94	57,31	-264,22	306,82	-106,00	-1,96
Média						1,56

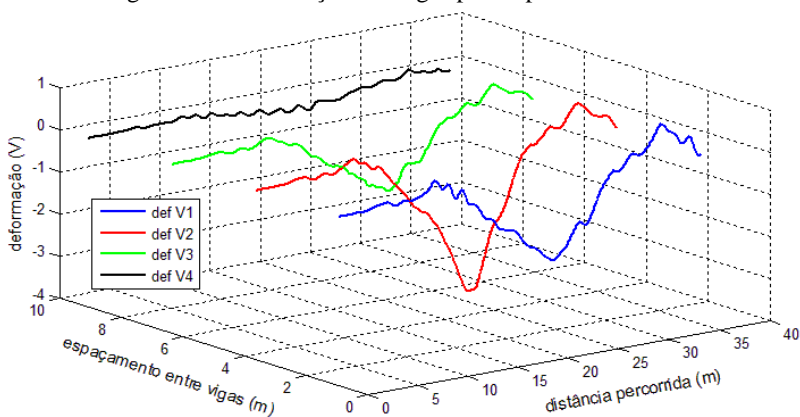
5.4. Distribuição transversal dos esforços

Vários estudos são feitos comparando métodos teóricos de distribuição transversal da carga ao comportamento da ponte obtido por meio de modelos de grelhas ou elementos finitos.

Com os sinais de deformação que ocorrem em cada viga, obtidos pelos extensômetros instalados no meio do vão de cada uma, pode-se ter noção do comportamento da ponte. A Figura 45 mostra um trecho do sinal de deformação obtido no primeiro evento de calibração.

É nítido que a segunda viga foi a que mais se deformou. Este comportamento é similar em todas leituras de deformação, independente do número de eixos, mudando apenas a intensidade desta deformação. Este comportamento foi ocasionado pela da posição transversal do caminhão sobre a ponte indo na direção sul. Almeida (2015) também observou um comportamento semelhante, com a segunda viga sofrendo maior deformação em seus modelos de grelha e elementos finitos.

Figura 45 - Deformação das vigas para o primeiro evento



Considerando como coeficiente de distribuição transversal da carga a proporção entre as deformações medidas numa região no centro do vão, usando as 60 maiores medidas de deformação da viga mais solicitada e os valores correspondentes das demais vigas, obteve-se a seguinte média de fatores de distribuição, respectivamente para vigas V1, V2, V3 e V4.

$$\mathbf{Q} = [0,2806 \ 0,4582 \ 0,2268 \ 0,0344]$$

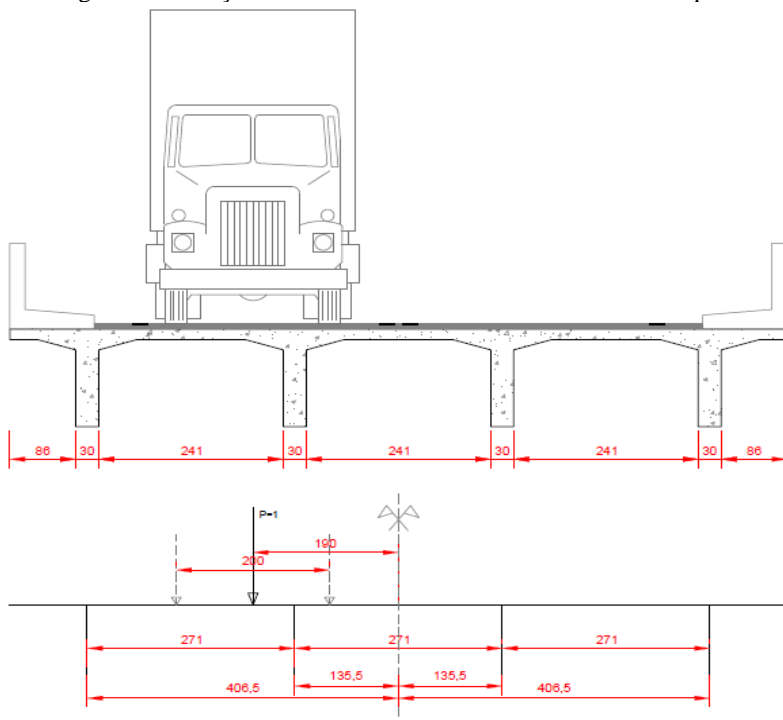
Quando as deformações são suavizadas os coeficientes de distribuição transversal da carga nesse caso são praticamente iguais:

$$\mathbf{Q} = [0,2808 \ 0,4576 \ 0,2270 \ 0,0345]$$

A Figura 46 mostra um esquema com a posição mais provável do caminhão. O peso do caminhão sobre a ponte Lambari está predominantemente sobre a viga 2. A partir desta figura, são avaliados os coeficientes de distribuição transversal por outros métodos estudados, como: Courbon, que considera a transversina de apoio infinitamente rígida; Leonhardt, que considera a rigidez da transversina em relação a das longarinas e obtém valores tabelados para obtenção da linha de influência transversal permitindo então a obtenção dos fatores de distribuição para aquela dimensão; o método de Fauchart, que usa a rigidez real da laje e coeficientes de mola considerando a deformação vertical e angular de cada longarina; o método da AASHTO, baseado

principalmente em medidas de distância e que, como método normativo, tende a apresentar valores majorados em relação aos demais métodos; e por fim o método explicado por Li e Chen (2011) que considera o comportamento de um pórtico que representa a seção transversal da ponte, incluindo assim a resistência à torção das vigas.

Figura 46 - Posição transversal das rodas do caminhão sobre a ponte



Pelo método de Engesser-Courbon, a parcela da carga que iria para cada viga é calculada como apresentado no item 2.3.1. O cálculo abaixo mostra a carga absorvida pela viga 2 caso a laje, ou a transversina no meio do vão, sejam completamente rígidas.

$$R_2 = \frac{1}{n} + \frac{e \cdot x_2}{\sum_{i=1}^n x_i^2} = \frac{1}{4} + \frac{1,90 \cdot 135,5}{2 \cdot 135,5^2 + 2 \cdot 2406,5^2} = 0,3201 \quad (6.1)$$

O mesmo cálculo é feito para todas as vigas resultando no conjunto de valores de coeficientes de distribuição transversal dado por:

$$Q = [0,4603 \ 0,3201 \ 0,1799 \ 0,0397]$$

Avaliou-se o método de Leonhardt, usando as tabelas de distribuição feitas por ele, como explicado no item 2.3.2. Para isso deve-se usar o coeficiente calculado como mostra a equação a seguir.

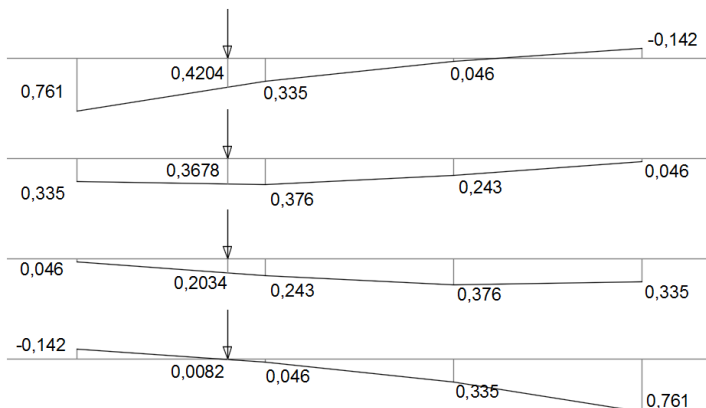
$$\zeta = \frac{I_T}{I_L} \left(\frac{L}{2\varepsilon} \right)^3 \quad (6.2)$$

A viga transversina tem dimensões 30x125, a longarina tem a seção te apresentada na Figura 28 e o espaçamento entre vigas ε é de 2,71 m. O grau de rigidez resulta em 8,04, aproximadamente 8 da tabela de Leonhardt. Os coeficientes de repartição para cada viga para o grau de rigidez 8 são:

$r_{11}=0,761$	$r_{12}=0,335$	$r_{13}=0,046$	$r_{14}=-0,142$
$r_{21}=0,335$	$r_{22}=0,376$	$r_{23}=0,243$	$r_{24}=0,046$
$r_{31}=0,046$	$r_{32}=0,243$	$r_{33}=0,376$	$r_{34}=0,335$
$r_{41}=-0,142$	$r_{42}=0,046$	$r_{43}=0,335$	$r_{44}=0,761$

Este método é bastante gráfico, para cada viga são desenhadas as linhas de influência usando esses valores como referência e então é posicionada a carga unitária no ponto resultante das rodas do caminhão. A Figura 47 seguinte mostra como são obtidos os fatores de distribuição da carga móvel para cada viga.

Figura 47 - Obtenção dos fatores de distribuição por viga usando Leonhardt



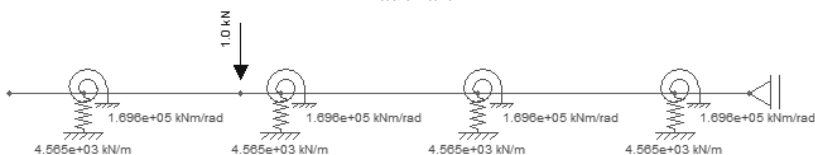
Os coeficientes obtidos para quando o caminhão está nesta posição são os seguintes:

$$\mathbf{Q} = [0,4204 \ 0,3678 \ 0,2034 \ 0,0082]$$

Usando o processo de Fauchart, explicado no item 2.3.3., para obtenção das deformações e avaliação da parcela da carga que se distribui para cada viga, usa-se a estrutura representada na Figura 48. Para o cálculo dos coeficientes de mola vertical e transversal são usadas as equações apresentadas em (2.8). Nestas é necessário conhecer o módulo de elasticidade E e módulo de elasticidade transversal G , que foram calculados de acordo com as equações sugeridas pela norma brasileira de estruturas em concreto armado NBR 6118/2014. Para o momento de inércia I_L e o momento polar de inércia transversal J considerou-se seção $tê$ com largura da mesa de 1,90 m. Usando o vão entre pilares de 15 m foram obtidos os seguintes valores de resistência das molas:

$$k_v = 4565 \text{ kN/m}^2 \text{ e } k_t = 169646 \text{ kN/m}^2$$

Figura 48 - Deformação da seção transversal da ponte usando o método de Fauchart



Obtida com o uso de um programa de análise linear de estruturas, a parcela da deformação, ou a parte da carga absorvida por cada longarina é:

$$\mathbf{Q} = [0,2720 \ 0,5090 \ 0,1605 \ 0,0585].$$

O processo de Fauchart, que considera a resistência à torção de cada viga e a rigidez da laje é bem mais próximo ao real, fato evidenciado por a deformação calculada ser bem semelhante à deformação medida, causada pela passagem dos caminhões.

Diferentemente do método de Courbon, que considera rigidez infinita da transversina, e do método de Fauchardt, que considera a rigidez real da laje, o método da AASHTO, já apresentado no item

2.3.4., considera rigidez quase nula para a laje. Assim os esforços são distribuídos apenas para as duas vigas adjacentes à carga.

O cálculo do coeficiente de distribuição da carga para a viga interna, no caso de carregamento em apenas uma via, segue a Equação (2.15). Nela a distância entre longarinas (S) é 2710 mm, o vão das vigas é 15000 mm, a espessura da laje é 150 mm e da rigidez da ponte (K_g) depende do momento de inércia (I_L), $1,2871 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$, a área (A), que é de 660000 mm^2 e a distância entre o centro geométrico da viga e o centro da laje (e_g) dada por 397,73 mm. Usando estes dados obtém-se:

$$g_{int} = 0,06 + \left(\frac{2710}{4300}\right)^{0,4} \left(\frac{2710}{15000}\right)^{0,3} \left(\frac{2,3311 \cdot 10^{11}}{15000 \cdot 150^3}\right)^{0,1} = 0,6397 \quad (6.3)$$

Para a viga externa usa-se simplesmente a regra da alavanca da Equação (2.17). Neste caso a distância entre a primeira viga e a borda da ponte é de 3720 mm e a distância entre a carga e a borda é 3175 mm. Assim calcula-se a parcela de carga que vai para a viga.

$$g_{ext} = \frac{3720 - 3175}{2710} = 0,2011 \quad (6.4)$$

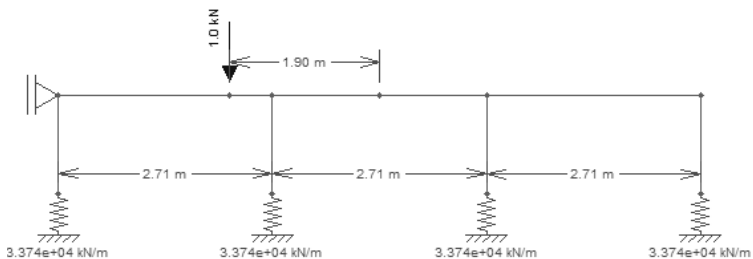
Nesse caso os coeficientes somados não resultam na unidade. Ao momento calculado para as vigas da ponte multiplica-se esse fator.

Para o momento os coeficientes usados normativamente seriam então:

$$\mathbf{Q} = [0,2011 \ 0,6397 \ 0,6397 \ 0,2011]$$

Seguindo os passos apresentados no item 2.3.6. do trabalho de Li e Chen (2011), chega-se ao pórtico da Figura 49.

Figura 49 - Pórtico para cálculo da distribuição transversal segundo Li e Chen, 2011



Como explicado por Li e Chen (2011) este pórtico tem largura igual a $L/3$, neste caso então, 5 m. Para altura da laje usa-se sua espessura, de 15 cm. Para a altura das vigas usa-se a largura da alma, 30 cm, e os mesmos 5 m de largura. Posicionando a carga unitária no ponto resultante das cargas das rodas dos caminhões pode-se avaliar os deslocamentos. Os fatores encontrados foram os seguintes:

$$Q = [0,2068 \ 0,7510 \ 0,0768 \ -0,0346]$$

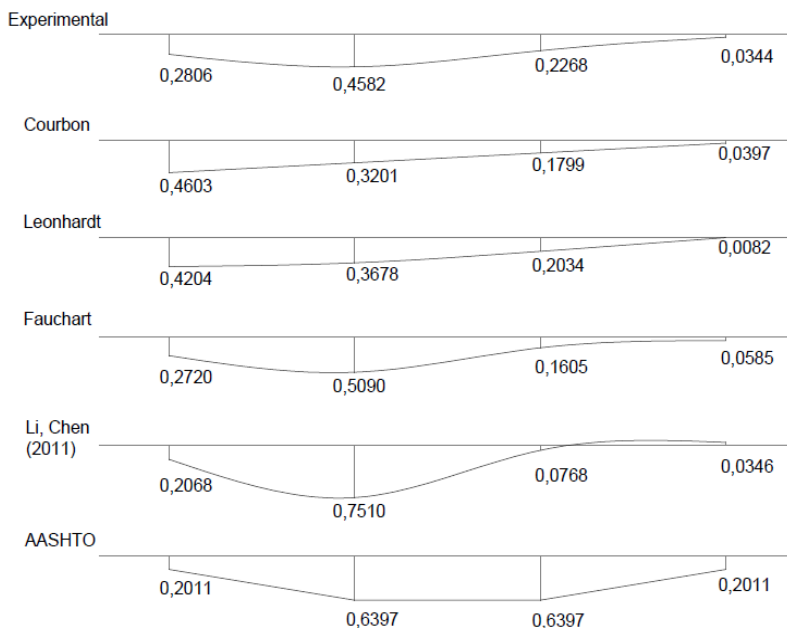
Estes valores são bem diferentes da distribuição encontrada a partir de dados experimentais. A laje é bastante flexível e a carga fica quase totalmente descarregada na viga mais próxima, sendo que a última chega a ter reação negativa. É interessante ressaltar que este modelo não reflete somente a reação das vigas, mas também inclui o efeito da geometria da seção transversal na distribuição da carga, como a resistência à torção entre as vigas e a laje. O fator de distribuição da carga móvel para uma viga específica é a máxima proporção possível desta carga para aquela viga considerando um posicionamento aleatório do caminhão sobre a laje da ponte.

A Figura 50 mostra a comparação das deformações da seção transversal para todos esses métodos. Os métodos teóricos foram avaliados considerando inicialmente apenas a carga unitária concentrada na posição resultante.

Analisando essa figura percebe-se que o método de Fauchart, que considera a rigidez a torção das vigas, é o que mais se aproximou do obtido experimentalmente a partir de dados de deformação de todas as vigas, aqui identificado como o método de Zhao. O método de Courbon, que considera que a seção transversal tem rigidez infinita, apresenta o maior valor para a viga extrema, o que não está de acordo com as deformações medidas, já que a viga 2 sofreu as maiores deformações. O método de Leonhardt não considera rigidez infinita, mas resulta em comportamento próximo ao de Courbon, já que os maiores esforços são direcionados à viga 1, permitindo concluir que a rigidez considerada é maior que a real. O método descrito por Li e Chen (2011) resulta em deformações muito grandes para a laje, possivelmente por usar como dimensões a altura da laje e 5 metros na outra direção e por, diferentemente do caso de Fauchart, depender também da deformação das vigas, cuja seção não é bem representada neste caso. O método da AASHTO é normativo, portanto só tem valores para viga externa e

interna que foram espelhados. Ainda que a ideia de muitos métodos normativos seja manter o conservadorismo, pode-se notar que para a viga externa o valor da AASHTO é inferior ao de Zhao.

Figura 50 - Deformação da seção transversal da ponte conforme métodos de cálculo apresentados



É importante ressaltar que a posição do caminhão foi baseada no projeto da ponte, tentando posicioná-lo no meio da pista de rolamento, o que não necessariamente ocorreu nos eventos de calibração.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

Neste trabalho os conhecimentos adquiridos sobre sistemas de pesagem em movimento em pontes (BWIM) e distribuição transversal das cargas foram aplicados em uma ponte brasileira situada na rodovia BR 153 em Uruaçu, Goiás.

Como proposto inicialmente, foram implementados dois algoritmos, sendo o primeiro como o de Moses e o segundo como o indicado por Zhao et al (2014), considerando que parcelas diferentes da carga do caminhão vão para cada longarina. Esta etapa permitiu o real entendimento do sistema BWIM, pois houve a necessidade de se estudar as equações de resolução do método, o tamanho dos sinais de deformação e sua relação com o vetor LI calculado, dentre outras questões para que os algoritmos funcionassem corretamente.

Com relação às linhas de influência calculadas, observou-se que com o algoritmo 1 a LI total, embora com formato um pouco irregular, apresentou comportamento semelhante ao teórico. Ocorreu um pico, bem no meio do vão, onde estavam os sensores, e valores negativos na região dos balanços. A ordenada máxima, 2,80, fica entre as ordenadas máximas das LIs teóricas obtidas por modelo simplesmente apoiado e totalmente engastado.

Usando o segundo algoritmo, são calculados inicialmente os coeficientes de distribuição transversal da carga das rodas, com os quais nota-se que a viga 2 recebe a maior parcela do carregamento, em torno de 45%, As vigas 1 e 3 recebem em torno de 28% e 23% da carga respectivamente e a viga 4, na exterminada oposta, absorve apenas 3% a 4% de carregamento.

Quanto à quantidade ideal de medidas de deformação a ser usada para o cálculo desse coeficiente, foi verificado que com 60 leituras, correspondentes a um trecho em torno de 20% do vão na velocidade média de calibração, os erros são menores.

Com a obtenção de uma LI para cada viga por meio do algoritmo 2, foi possível verificar o comportamento individual de cada longarina. A viga 4, na qual as medidas de deformação são menores tornando o ruído do sinal mais significativo, a LI obtida tem maiores amplitudes e oscilações. A viga 2 tem ordenada de LI 10% maior que as vigas 1 e 3. Em comparação com a LI total, obtida com o algoritmo 1, a LI da viga 2 tem ordenada máxima 5% maior. As vigas 1 e 3 tem LI 5 % menor.

Logo a LI representativa de um comportamento global da ponte pode ser considerada como uma média entre as LIs das vigas externa e interna. Com a diferença de apenas 5% pode-se dizer que o uso de uma única LI representa bem o sistema.

Analisando as LIs reais conclui-se que a relação dos apoios com a superestrutura implica na absorção de um certo valor de momento fletor e que, portanto, a condição de apoio apresenta um comportamento intermediário entre o de viga apoiada e engastada. A ordenada máxima da LI calculada é cerca de 25% menor que a do modelo apoiado.

É importante comentar que as linhas de influência obtidas neste trabalho são específicas para esta ponte e que os resultados obtidos não podem ser generalizados para dimensionamento de outras pontes, mas sim usados para a avaliação de sua segurança.

Com relação aos pesos dos veículos cabe ressaltar que por não existir um posto de pesagem próximo, não houve a possibilidade de avaliar o erro entre peso real, medido estaticamente, e o peso calculado pelo algoritmo para veículos do tráfego normal. Logo, os pesos foram avaliados usando os próprios eventos de calibração.

O peso bruto total calculado pelo algoritmo 1 apresentou erro de -4,11% no pior caso, sendo que a média entre os erros absolutos do PBT foi de 2,58%. Ao considerar o efeito da transversalidade das cargas o erro máximo caiu para -3,85% e a média para 2,49%. Quando desconsiderada a última viga, que devido a suportar valores baixos do carregamento (em torno de 4%) sua LI apresenta um formato influenciado pelos ruídos de medição, esta média cai para 2,17%. Deste modo, pode-se concluir que a consideração da distribuição transversal torna os resultados de PBT mais precisos.

Por outro lado, quanto aos pesos dos eixos, no algoritmo 1 os erros chegaram a -35%. No algoritmo 2 o erro no pior caso aumentou 0,72%. Ao remover a última viga o erro aumentou novamente. Esta análise permite concluir que a consideração da transversalidade não é favorável quando se trata de pesos de eixos individuais. Porém, entende-se que com erros tão grandes, este sistema BWIM não possa ser usado com a finalidade de pesar cada eixo individualmente.

O processo de filtragem do sinal de deformação resultou em linhas de influência mais suaves, com ordenada máxima 35% menor que o do modelo teórico apoiado e 15 % menor que a LI total obtida sem filtragem. Considerando a distribuição transversal a LI da viga 4 passou a apresentar a menor ordenada e a viga 2 a maior, sendo todos os valores bastante próximos. Neste caso, porém, as ordenadas dessas LIs são bem

menores do que a obtida pelo algoritmo 1, ou seja, uma média entre as LIs das vigas externa e interna não representaria toda a ponte.

A frequência natural da ponte não foi calculada, porém, com base nos estudos de O'Brien, Gonzalez e Dowling (2010) a frequência de filtragem foi definida como aquela que mantivesse apenas o primeiro pico que caracteriza o sinal. A frequência escolhida como 2 Hz mantém o primeiro pico e elimina todos os demais. Esta frequência aplicada ao filtro Gaussiano mostrou-se suficiente para os objetivos de suavizar a LI e avaliar sua precisão a partir da pesagem.

Sobre os pesos calculados a partir da LI filtrada conclui-se que os PBT tornaram-se mais precisos, com erro médio de 1,65% no caso do algoritmo 1 e 1,56% com o algoritmo 2. Há, porém, uma evidente redistribuição dos pesos por eixos, já que os erros neste caso chegam a 40% para o veículo de 3 eixos e em alguns casos a 300% para o veículo de 5 eixos.

Com relação à análise da distribuição transversal da carga em comparação a métodos teóricos, verificou-se que o processo de Fauchart é o que mais se assemelha ao comportamento observado da ponte. O fato de existir um método teórico que resulta em coeficientes de distribuição transversal próximos aos obtidos a partir de dados de deformações das vigas indica que o método utilizado neste trabalho, proposto por Zhao et al (2014) pode representar a transversalidade das cargas dessa ponte.

Por fim, conclui-se que para fins de pesagem o sistema BWIM mesmo não sendo um método exato, mostra-se é viável para pré-seleção de veículos, do mesmo modo como o sistema WIM vem sendo utilizado. A precisão nos resultados do peso bruto total pode ser aumentada quando considerada a transversalidade dos esforços a partir de coeficientes de distribuição transversal obtidos da relação entre as deformações das vigas. Além da possibilidade de obtenção do tráfego real, a aplicação do método é indicada para a avaliação de pontes, já que é possível obter as linhas de influência reais de cada viga, a partir do carregamento estrutural observado. A utilização de linhas de influência reais, onde qualquer efeito de degradação na estrutura já é levado em consideração, possibilita o cálculo dos esforços reais atuantes na estrutura, que dependendo da LI obtida, poderão ser até menores que os obtidos com a LI teórica.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros:

Como recomendações para trabalhos futuros sugerem-se:

(1) A aplicação deste sistema, bem como dos algoritmos desenvolvidos, em pontes com diferentes números de longarinas, para melhor avaliação dos efeitos da transversalidade;

(2) Desenvolvimento de modelos em elementos finitos para melhor visualização desta distribuição transversal bem como dos efeitos dinâmicos;

(3) Alterar os valores de EW de cada longarina e avaliar os efeitos em relação ao uso de longarinas iguais;

(4) Prosseguir com estudos do sistema BWIM considerando múltipla presença de caminhões, elevados efeitos dinâmicos, fadiga, dentre outras avaliações;

(5) Aplicação de outros métodos de minimização do erro como o método da máxima verossimilhança e abordagem Bayesina;

(6) Avaliar a possibilidade da obtenção da constante EW a partir destes dados experimentais. Desta forma não seria necessário usar os valores de módulo de elasticidades baseados na resistência de cálculo de projeto ou dimensões de projeto, já que para pontes antigas muitas vezes o projeto não está disponível, nem usar de ensaios in loco, ainda que não destrutivos para obter o valor de E. Caso possível, muitas pontes poderiam ser avaliadas estruturalmente com este método, descobrindo a necessidade de intervenção em cada viga, especificamente;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. **LRFD Bridge Design Specifications**, 2002.

ALMEIDA, V. de S. **Influência da distribuição transversal de cargas no projeto de vigas protendidas de pontes**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ALVES, E. V.; ALMEIDA, S. M. F.; JUDICE, F. M. de S. Métodos de análise estrutural de tabuleiros de pontes em vigas múltiplas de concreto protendido. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 2, p.48-58, ago. 2014.

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

BRITO, L. A. T. *et al.* Implantação de um sistema de pesagem em movimento em alta velocidade na rodovia BR-290/RS, Free Way, para estudo de espectro de cargas comerciais rodantes. **Estradas**, Porto Alegre, v. 18, out. 2013.

BROWN, A. J. **Bridge Weigh-In-Motion Deployment**: Opportunities in Alabama. Tese (Doutorado) - Department Of Civil, Environmental And Construction Engineering, University Of Alabama, Tuscaloosa, 2011.

CARVALHO NETO, J; VELOSO, L. A. C. M. Pesagem em Movimento de trens com uso da Técnica B-WIM em um Viaduto de Concreto Armado. **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2014**, Natal, outubro 2014.

CESTEL. **More about SiWIM system**. Disponível em: <<http://www.cestel.eu/>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

CONTRAN. **Resolução nº 12/98 do Contran**. Brasília, 6 de fevereiro de 1998.

COST 323. **Weigh-in-Motion of Road Vehicles – Final Report**. European WIM Specifications, Version 3.0. Agosto, 1999.

GOLTSMAN, H. Identificação de sistemas de pesagem em movimento. **1st International Seminar of Weigh in Motion (WIM)**, Florianópolis, 2011.

GONZÁLEZ, A. *et al.* Testing of a Bridge Weigh-in-Motion Algorithm Utilising Multiple Longitudinal Sensor Locations. **Journal Of Testing And Evaluation**, v. 40, n. 6, p.1-14, 2012.

IENG, S. Bridge Influence Line Estimation for Bridge Weigh-in-Motion System. **Journal Of Computing In Civil Engineering**, 2015.

JUNGES, P.; PINTO, R. C. A.; MIGUEL, L. F. F. Linha de Influência Real de Pontes Utilizando sistemas BWIM. **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto**, Natal, 2014.

KALIN, J.; ZNIDARIC, A.; LAVRIC, I. Pratical implementation of Nothing-on-the-Road Bridge Weigh-In-Motion System. **Slovenian National Building And Civil Engineering Institute**, Ljubljana, 2006.

LI, J.; CHEN, G. Method to Compute Live-Load Distribution in Bridge Girders. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 16, n. 4, p.191-198, 2011.

LUCHI, L. A. R. **Reavaliação do trem-tipo à luz das cargas reais nas rodovias brasileiras**. 2006. 282 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MENDES, P. D. T. C. **Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicada à rede de rodovias brasileiras**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

O'BRIEN, E.; GONZÁLEZ, A.; DOWLING, J.. A filtered measured influence line approach to bridge weigh-in-motion. **University College Dublin Library**, Dublin, 2010.

O'BRIEN, E. QUILLIGAN, M. KAROUMI, R. Calculating an influence line from direct measurements. **Proceedings of the ICE – Bridge Engineering**, v. 159, Issue, 2006.

PEREIRA, E. **Apontamentos de Linhas de Influência**. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1994.

QUILLIGAN, M. **Bridge weigh-in-motion** – development of a 2-D multi-vehicle algorithm. Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, 2003.

RAZAQPUR, A. G.; SHEDID, M.; NOFAL, M. Inelastic load distribution in multi-girder composite bridges. **Engineering Structures**, v. 44, p.234-247, nov. 2012

SILVA, P. F. *et al.* Efeitos da Mudança da NBR 7188:2013 nos Projetos de Pontes.: Estudo de Caso: Projeto de Recuperação da Ponte sobre o Rio Correias na BR 101/SC. **VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**, Rio de Janeiro, 2014.

STUCCHI, F. R. **Pontes e grandes estruturas**. São Paulo: Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, 2006.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de Análise Estrutural**. Porto Alegre: Globo, 1973.

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, p.527-536. 2010.

ZHAO, H.; UDDIN, N. Algorithm to identify axle weights for an innovative BWIM system - Part II. **Joint Conference On Advances In Bridge Engineering-II**. Dhaka, Bangladesh, p.537-546. 2010.

ZHAO, H. *et al.* Identification of Vehicular Axle Weights with a Bridge Weigh-in-Motion System Considering Transverse Distribution of Wheel Loads. **Journal Of Bridge Engineering**, v. 19, p.1-16, 2014.

ZOKAIE, Toorak. AASHTO-LRFD Live Load Distribution Specifications. **Journal Of Bridge Engineering**, v. 5, n. 2, p.131-138, 2000.

APÊNDICE A

1. Primeiro algoritmo: Algoritmo de Moses

Usando um arquivo de calibração, com as medidas de deformação decorrentes da passagem de um caminhão de peso conhecido, seguem-se os passos:

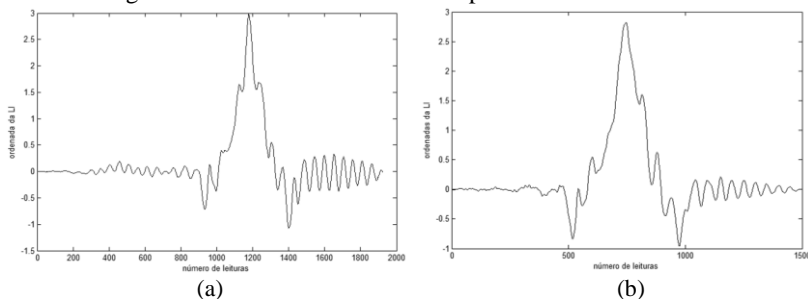
- 1) Criou-se inicialmente um algoritmo para entrada de dados dos eventos de calibração. Esta entrada de dados é feita a partir da leitura de um arquivo texto que contém as medidas das deformações (em Volts) de cada sensor, sendo que alguns destes sensores estão nas vigas e alguns na laje. Com estes dados sabe-se qual o número de eixos do caminhão que passou sobre a ponte. É feita a média entre os sensores que estão na mesma viga. Neste arquivo também é informada a velocidade de passagem do veículo e o número total de leituras.
- 2) A segunda rotina utilizada contém dados gerais, válidos para todos os eventos, tais como tamanho da ponte, número de vigas, módulo de elasticidade E e módulo resistente W das vigas, frequência de aquisição dos dados e medidas dos caminhões de calibração, tais como distância entre eixos e pesos de eixos. Usando o número de eixos e a velocidade obtidos na rotina anterior já é possível calcular nesta etapa o vetor \mathbf{C} correspondente ao número de leituras obtidas na distância entre o eixo em questão e o primeiro, sendo $[C_1 C_2 C_3]$ para 3 eixos e $[C_1 C_2 C_3 C_4 C_5]$ para 5 eixos.
- 3) No algoritmo principal, após chamar estas duas rotinas, cria-se um vetor de deformações, no qual são somadas as deformações médias calculadas no item anterior. A partir destas deformações cria-se um vetor de momentos multiplicando-as pela constante EW .
- 4) O vetor \mathbf{M} do algoritmo de Moses é então criado, como mostra a Equação (3.21), usando o vetor momentos do item anterior e os pesos dos eixos. Este vetor terá ordem $K-C_N$.
- 5) Usando apenas o número de leituras e os valores dos pesos dos eixos, calcula-se, então, a matriz \mathbf{A} , como mostram as equações em (3.13) e (3.20);
- 6) Com o vetor \mathbf{M} e a matriz \mathbf{A} definidos, encontra-se o vetor \mathbf{I} , com as ordenadas da linha de influência da ponte para aquele

evento, a partir da inversão da matriz \mathbf{A} , como mostra a Equação (3.22).

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{M}$$

Como exemplo pode-se usar o primeiro evento de calibração, referente a um veículo de 3 eixos, para o qual foram registradas 2048 medidas de deformação. Usando a velocidade apresentada na Tabela 5 e a frequência de aquisição de dados do sistema (512 Hz) calcula-se o valor de C3, 124. O vetor \mathbf{M} tem ordem 1924×1 ($K\text{-CN} \times 1$), a matriz \mathbf{A} fica com ordem (1924×1924) e o vetor $\{\mathbf{I}\}$, analogamente, também tem 1924 valores. A linha de influência gerada então é a apresentada na Figura 51 (a). Usa-se também como exemplo o nono evento de calibração, de um veículo com 5 eixos. O vetor contém 1690 leituras de deformação, o valor C5 é 205. O vetor \mathbf{M} , a matriz \mathbf{A} e o vetor \mathbf{I} terão, então, ordem 1485. A linha de influência obtida é a Figura 51 (b).

Figura 51 - Linhas de influência do primeiro e nono eventos



Para cada um dos 14 eventos individualmente obtém-se uma linha de influência. Com a linha de influência segue-se para a próxima etapa, na qual são obtidos os pesos dos eixos. Usa-se então um algoritmo que contém os passos seguintes:

- 1) São chamadas as mesmas rotinas de entrada de dados usadas anteriormente para obter as informações gerais da ponte e do caminhão e as deformações geradas por ele, formando um vetor com K valores;
- 2) Em seguida cria-se uma matriz de linhas de influência \mathbf{IL} , que corresponde à ordenada da linha de influência sob cada eixo no instante k , como mostra a Equação (3.27). Esta matriz terá K linhas e número de colunas igual ao número de

eixos. Enquanto o eixo em questão ainda não atingiu a ponte (ou a região que está sendo analisada), ou quando já saiu dela a ordenada da linha de influência sob esse eixo é zero;

- 3) Com os valores de deformação e essa matriz das ordenadas das linhas de influência sob cada eixo é possível encontrar os pesos dos eixos usando a Equação (3.31):

$$\mathbf{P} = (\mathbf{IL}^T \cdot \mathbf{IL})^{-1} \cdot \mathbf{IL}^T \cdot \boldsymbol{\epsilon}^m$$

- 4) Somando os pesos de todos os eixos tem-se o peso bruto total (PBT). Comparando os pesos encontrados com o peso real calcula-se o erro por eixo.

Usando como dados de entrada exatamente os usados no algoritmo anterior para obtenção da linha de influência, ou seja, ao usar o mesmo evento que o usado para calibração, espera-se que sejam obtidos exatamente os pesos dos eixos, ou ao menos com erros muito pequenos, já que é somente o processo inverso.

A exemplo disso, usando o evento 1 e a linha de influência ilustrada na Figura 51 (a) os pesos e erros encontrados são os seguintes:

$$\begin{aligned} P1 &= 46,609 \text{ kN}; \quad P2 = 110,047 \text{ kN}; \quad P3 = 107,256 \text{ kN} \\ PBT &= 26.3912 \text{ tn} \\ E1 &= -0,20\%; \quad E2 = 1,29\%; \quad E3 = -1,28\% \\ \text{ErroTotal} &= 0,033\% \end{aligned}$$

Com o nono evento acontece algo semelhante, os erros por eixo são inferiores a 0,25% e o erro total é de apenas 0,015%.

A linha de influência obtida com uma única leitura, não pode ser considerada como a linha de influência de todo o sistema, já que se baseia nas características de um único sinal, como efeitos dinâmicos e número de leituras, que variam para cada evento. Usando, por exemplo, a linha de influência obtida no evento 1 para cálculo do peso do caminhão no evento 9, cujo sinal tem características relativamente diferentes do sinal 1, pois a velocidade de passagem e o veículo usado são diferentes, os resultados contêm grandes imprecisões. Assim, torna-se possível compreender a necessidade de usar vários eventos de calibração, obtendo várias linhas de influência individuais, e então fazer a média entre elas, para que possa ser usada como linha de influência do sistema, com resultados satisfatoriamente precisos para qualquer tipo de caminhão.

A partir das imagens da Figura 51, nota-se, como já mencionado no capítulo anterior, que as ordenadas da LI começam muito antes do

início da ponte efetivamente. Além disso não há um ponto exato definido como início das leituras. Assim como a velocidade de passagem dos caminhões não é exatamente a mesma em todos os eventos. Mesmo entre eventos de calibração gerados pelo mesmo veículo, com velocidade semelhante, o número de leituras é diferente. Deve-se garantir, portanto, que quando do processo da média, todas as LIs tenham o mesmo comprimento.

Foi desenvolvida então uma forma que permitisse que todas as LIs passassem a ter o mesmo tamanho, ou seja, mesmo número de elementos no vetor. A rotina seguinte utiliza um algoritmo praticamente igual ao primeiro para obtenção da linha de influência de cada evento.

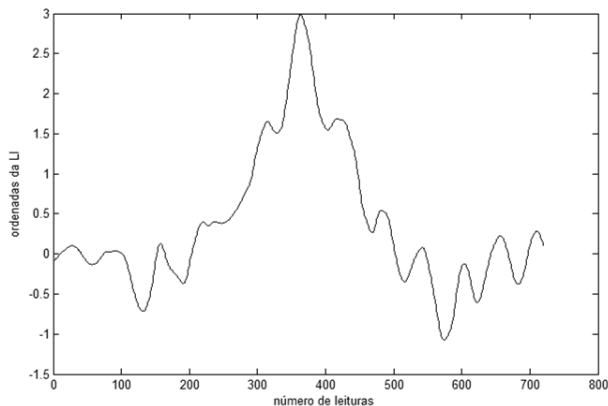
Em seguida utiliza-se outra rotina que encontra o instante em que o primeiro eixo do caminhão atinge o primeiro sensor de deformação instalado na laje (FAD). Esse ponto é sempre o mesmo em todas as corridas de calibração. Quando o sensor FAD fixado no meio do vão tiver seu primeiro pico, o caminhão está com o primeiro eixo bem acima do sensor.

- 1) A rotina procura esse primeiro pico, que é chamado de instante $k_{\text{máx}}$;
- 2) Resolveu-se considerar 18 m à frente e 18 m para trás deste ponto. Esta distância é uma medida aleatória, maior que metade da ponte. Como os números de leituras dos eventos de Lambari são grandes, foi possível pegar uma distância longa também após a ponte. Esta medida foi definida como padrão para igualar todos sinais, porém qualquer medida maior que metade da ponte poderia ser usada. Transformando essa medida em metros para número de leituras, usando frequência e velocidade, pode se encontrar, a partir do $k_{\text{máx}}$, um k_{inicial} 18 m antes do meio da ponte e um k_{final} 18 m depois do meio da ponte.
- 3) No espaço de 36 m há K leituras. Isso quer dizer que há uma leitura a cada $36/K$ metros. Tendo esse valor pode-se criar um vetor com as distâncias até 36 m. A partir desse vetor com as distâncias, foi realizada uma interpolação linear entre os valores da linha de influência, encontrando valores a cada 5 cm. Assim a linha de influência fica com 720 valores;
- 4) O mesmo é feito para qualquer outra linha de influência gerada com um número aleatório de valores, que ao passar por este algoritmo de regularização do tamanho por interpolação de valores a cada 5 cm, ficará com 720

ordenadas da linha de influência. Permite-se assim fazer a média entre as linhas de influência encontradas em cada sentido.

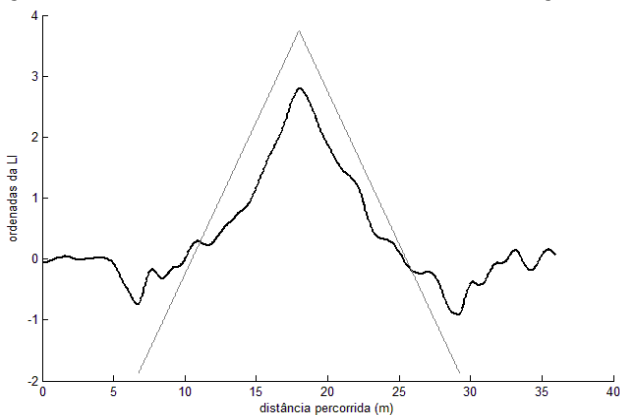
Usando a primeira leitura como exemplo novamente, na qual o caminhão possui velocidade de 24,28 m/s, são lidas as deformações e calculada a LI, um vetor que tem 1924 valores. O valor $k_{\text{máx}}$ encontrado está na 1175ª leitura, obtida 2,293 segundos após o início das leituras, o que corresponde a uma distância de 55,67 m percorridos do primeiro ponto lido ao ponto em que estão instalados os sensores. Desta distância reduziu-se 18 m para então encontrar um k_{inicial} , leitura número 795, e soma-se 18 m pra encontrar um k_{final} , leitura 1555. A linha de influencia passa a ter então 761 leituras. A cada 36m/761leituras há uma leitura, ou seja, as leituras são obtidas a cada 0,0473 m. Usa-se uma função de interpolação para interpolar linearmente os valores de linha de influência a cada 0,05 m. O formato da linha de influência é o mesmo nesta região, agora, porém, com 720 leituras apenas, como mostra a Figura 52.

Figura 52 - LI do primeiro evento considerando apenas 36 m



O mesmo procedimento é aplicado a todas as 14 linhas de influência. Fazendo, então, a média entre todos os eventos, a linha de influência encontrada é a mostrada na Figura 53, plotada junto à LI teórica. O formato da linha de influência se assemelha ao esperado, com o pico sobre os sensores e partes negativas nas regiões dos apoios.

Figura 53 - Linha de influência média obtida com o Algoritmo 1



A partir desta linha de influência média, o próximo passo é o cálculo do peso dos veículos. É necessário, no entanto, que a LI tenha um número de pontos compatíveis às leituras de deformação da ponte com a passagem de um veículo qualquer, com velocidade qualquer. Ou seja, a linha de influência que tem pontos a cada 5 cm deve apresentar novamente os pontos a cada $36/K$ m, onde K varia em cada leitura. Segue-se a mesma ideia anterior, usando a função de interpolação linear. Para cada evento, deixa-se a LI com o mesmo tamanho que o vetor de deformações do evento em questão, cujo trecho analisado será de 18 m antes e 18 m depois da posição dos sensores.

Após ajustar o tamanho do sinal analisado e obter número de pontos da LI média igual ao do sinal de deformação utiliza-se o algoritmo já descrito para obtenção dos pesos dos eixos. Cria-se a matriz \mathbf{IL} , obtêm-se os pesos dos eixos com a Equação (3.31), somam-se esses pesos, obtendo o peso bruto total do caminhão e então são calculados os erros.

2. Segundo algoritmo: Considerando a distribuição transversal dos esforços

Para obtenção das linhas de influência individuais de cada ponte devido à consideração da distribuição transversal, seguem-se os seguintes procedimentos:

- 1) As mesmas rotinas de entrada de dados já descritas, tanto específicos de cada evento de calibração quanto gerais da

ponte e dos veículos serão usadas. Neste caso para cada viga há um valor de EW_i . Para todas as vigas, inicialmente, é usado o mesmo valor EW_i .

- 2) No algoritmo principal, após chamar estas duas rotinas, cria-se uma matriz de deformações com número de linhas igual à quantidade de leituras de deformação e colunas igual ao número de vigas:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\text{defV1 defV2 defV3 defV4}] \cdot 16 \cdot 10^{-6} \quad (\text{A.1})$$

onde defVi é a média das deformações registradas nos sensores colocados em cada viga.

- 3) Então é usado um algoritmo para encontrar o coeficiente de distribuição transversal das cargas, desenvolvido seguindo o estudo de Zhao et al (2014). Neste encontra-se o valor da maior leitura dentre todas as deformações. Nesta viga definem-se os m maiores valores de deformação. Este valor de m pode ser alterado para avaliar qual a quantidade necessária para cada caso. São obtidos os m valores correspondentes nas demais vigas. Soma-se os valores das deformações das 4 vigas, restando m valores de deformação total por instante. Para cada um dos valores calcula-se um coeficiente de distribuição transversal, representado pela letra Q , como na Equação (3.38), pegando o valor da deformação e dividindo pela deformação total (soma das deformações de todas as vigas naquele instante).

Neste caso, com 4 vigas, para cada uma há um valor $Q_{j,k}$.

$$Q_{1,k} = \frac{\varepsilon_{1,k}}{\sum_{j=1}^4 \varepsilon_{j,k}} \quad Q_{2,k} = \frac{\varepsilon_{2,k}}{\sum_{j=1}^4 \varepsilon_{j,k}} \quad Q_{3,k} = \frac{\varepsilon_{3,k}}{\sum_{j=1}^4 \varepsilon_{j,k}} \quad Q_{4,k} = \frac{\varepsilon_{4,k}}{\sum_{j=1}^4 \varepsilon_{j,k}} \quad (\text{A.2})$$

Dentre os m valores de Q de cada longarina é feita a média e encontrado um coeficiente de distribuição transversal pra cada uma (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4).

- 4) Cada viga é avaliada separadamente. De forma semelhante ao algoritmo anterior obtém-se uma matriz momentos em que cada coluna, correspondente a deformação de cada viga, é multiplicada pela constante EW_i da viga em questão. Cria-se então uma matriz \mathbf{M} com número de colunas iguais ao número de vigas, no caso 4, e número de linhas igual a $K-C_N$.

Para o caso de um caminhão de 3 eixos tem-se para cada elemento:

$$M(k,g) = P_1 * Q(g) * \varepsilon(k,g) * EW(g) + P_2 * Q(g) * \varepsilon(k + C_{2,g}) * EW(g) + P_3 * Q(g) * \varepsilon(k + C_{3,g}) * EW(g) \quad (A.3)$$

De forma análoga para o veículo de 5 eixos os elementos são:

$$M(k,g) = P_1 * Q(g) * \varepsilon(k,g) * EW(g) + P_2 * Q(g) * \varepsilon(k + C_{2,g}) * EW(g) + P_3 * Q(g) * \varepsilon(k + C_{3,g}) * EW(g) + P_4 * Q(g) * \varepsilon(k + C_{4,g}) * EW(g) + P_5 * Q(g) * \varepsilon(k + C_{5,g}) * EW(g); \quad (A.4)$$

- 5) Então é calculada a matriz **A** para cada viga, considerando que a carga que vai para a viga 1 é o peso de cada eixo multiplicado pelo coeficiente $Q(1)$, de mesma forma pra as outras vigas. Ou seja, em todos os lugares da matriz **A**, que no algoritmo anterior recebiam o valor P_i , será usado neste algoritmo o valor $P_i Q_j$. Isto equivale a multiplicar os termos da diagonal principal da matriz **A** anterior (do algoritmo considerando somente uma linha de influência) por $Q(g)^3$ enquanto os demais elementos são multiplicados por $Q(g)^2$.
- 6) Invertendo as n matrizes **A** encontradas, neste caso 4, já que há 4 vigas, e multiplicando cada uma pela respectiva coluna da matriz **M** pode-se obter 4 vetores correspondentes às ordenadas da linha de influência em cada viga.

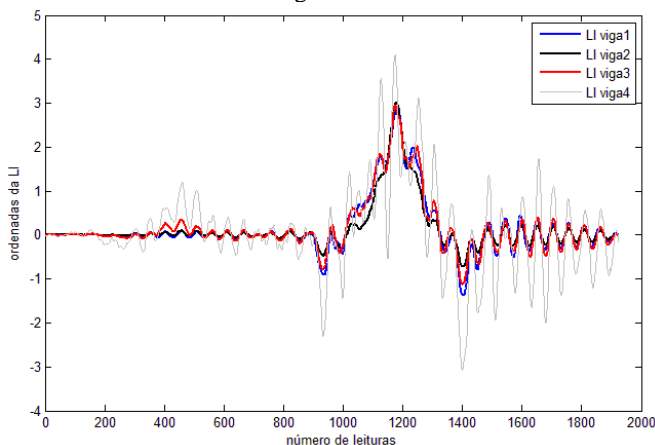
Usando novamente como exemplo o evento 1. Os valores obtidos para Q_j , usando inicialmente os 50 valores de deformação sugeridos por Zhao para calcular os coeficiente de distribuição transversal, são:

$$\mathbf{Q} = [0.2780; 0.4672; 0.2220; 0.0328]$$

Essa tendência repete-se nos demais eventos, podendo-se dizer que, em geral, mais de 45% da carga do veículo é absorvida pela viga 2, a viga 1 recebe em torno de 28% da carga, a viga 3 recebe pouco mais de 22% e a viga 4, externa da faixa oposta, recebe menos de 4% da carga do caminhão, sendo praticamente insignificante nos cálculos.

Voltando ao evento 1 de Lambari, seguindo as demais etapas do algoritmo obtém-se as 4 linhas de influência apresentadas na Figura 54.

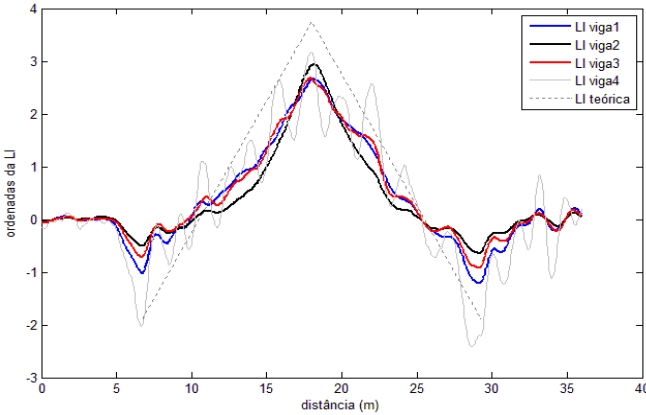
Figura 54 - Linhas de influência de cada viga obtidas para o evento 1 com Algoritmo 2



Como o processo de obtenção da linha de influência é feito para cada viga separadamente, sempre é usado o mesmo algoritmo, simplesmente alterando os dados de entrada, independente de quantas longarinas tenha a ponte em questão.

Ainda de forma análoga ao feito no primeiro algoritmo é necessário fazer com que todas as linhas de influência tenham o mesmo tamanho para que possa ser feita a média dentre todos os eventos. Portanto usa-se uma rotina semelhante a anterior, baseando-se no instante em que o primeiro eixo atinge o sensor, para transformar para metros as LIs. Assim ficam com 36 metros, 720 leituras, a cada 0,05 m. As linhas de influência médias das 4 vigas para os 14 eventos estão ilustradas na Figura 55.

Figura 55 - Linhas de influência médias obtidas com o Algoritmo 2



A partir destas linhas de influência médias pode-se encontrar os pesos dos eixos dos veículos. O cálculo é um pouco mais complexo que no primeiro algoritmo, visto que há 4 linhas de influência a serem usadas. Para resolver o problema então:

- 1) Criam-se n matrizes de linhas de influência, aqui chamadas \mathbf{I}^{Ci} , de ordem $K \times N$, usa-se as ordenadas da LI abaixo de cada eixo do caminhão. (onde n é o número de vigas e N é o número de eixos)
- 2) Tendo essas matrizes \mathbf{I}^{Ci} e o vetor com os coeficientes de distribuição transversal forma-se uma matriz \mathbf{F} com ordem $N \times N$. Essa matriz multiplicada pelos pesos por eixos resulta em um vetor \mathbf{m} , de ordem $N \times 1$, que depende dos coeficientes de distribuição transversal, dessa matriz de linhas de influência, do vetor de coeficientes \mathbf{EW} e das deformações. A resolução do sistema depende de uma sequência de cálculos descritos em Zhao et al (2014) e aqui reproduzidos:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial P_i} = 2 \cdot \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{I}^{CiT} \left(\sum_{i=1}^N P_i \cdot \mathbf{I}^{Ci} \cdot \mathbf{Q} - \mathbf{L} \right) = 0 \quad (\text{A.5})$$

Onde:

$$\mathbf{I}^{Ci} = \begin{bmatrix} I_{1,1-Ci} & I_{2,1-Ci} & \cdots & I_{j,1-Ci} \\ I_{1,2-Ci} & I_{2,2-Ci} & \cdots & I_{j,2-Ci} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{1,K-Ci} & I_{2,K-Ci} & \cdots & I_{j,K-Ci} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{L} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}\mathbf{W} \quad (\text{A.7})$$

Logo:

$$\mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{I}^{CiT} \sum_{i=1}^N P_i \cdot \mathbf{I}^{Ci} \cdot \mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{I}^{CiT} \cdot \mathbf{m} \quad (\text{A.8})$$

Assumindo:

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{I}^{CiT} \cdot \mathbf{L} \quad (\text{A.9})$$

$$f_{ij} = \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{I}^{CiT} \cdot \mathbf{I}^{Ci} \cdot \mathbf{Q} \quad (\text{A.10})$$

Então:

$$\mathbf{F} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{m} \quad (\text{A.11})$$

Onde:

$$\mathbf{P} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{m} = \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_N \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1N} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N1} & f_{N2} & \dots & f_{NN} \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{m} \quad (\text{A.13})$$

$$\text{PesoBrutoTotal} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (\text{A.14})$$

Dessa forma todas as vigas são usadas para obtenção dos pesos. Porém ao analisar as linhas de influência da ponte Lambari, nota-se que a última viga não tem dados precisos. Além disso, analisando também os sinais de deformação, a viga 4 deforma muito pouco, pois uma parte muito pequena do carregamento é suportada por ela, fato evidenciado também pelos coeficientes de distribuição transversal da carga.

Pode-se então fazer análise semelhante eliminando a última viga e utilizando as outras 3 que absorvem 96% do carregamento. Para isto o vetor de coeficientes de distribuição transversal fica com 1 elemento a menos e as matrizes \mathbf{I}^{Ci} ficam com uma coluna a menos. Para o cálculo dos pesos dos eixos adiciona-se um fator para excluir a influência da última viga como mostra a Equação (A.15).

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{m} \cdot (1 - Q_4) \quad (\text{A.15})$$

Implementados os 2 algoritmos pode-se avaliar as diferenças nos pesos dos eixos, comparando-os com os pesos reais.