

# LINHA TEMPORAL DOS SISTEMAS B-WIM E O USO DESSA TECNOLOGIA NO BRASIL

Emmanuelle Stefânia Garcia<sup>1</sup>, Keyla Junko Chaves Shinohara<sup>1</sup>, Roberto Caldas De Andrade Pinto<sup>1</sup>, Paulo Junges<sup>1</sup>, Amir Mattar Valente<sup>1</sup>

1: Laboratório de Transporte e Logística, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

## Resumo

A pesagem em movimento em pontes e viadutos, conhecida como *Bridge Weigh-in-Motion* (B-WIM) é uma tecnologia, instrumentada com *strain gauges*, utilizada para obter as informações dos veículos passantes (peso total, peso por eixo, velocidade, classificação veicular) e também características reais da estrutura. O uso dessa tecnologia, a partir da sua calibração, auxilia os órgãos responsáveis a direcionar e fazer melhor uso dos recursos financeiros destinados à manutenção e restauração das estruturas. O uso da tecnologia B-WIM teve início no mundo nos anos de 1970 e, no Brasil, os primeiros estudos ocorreram no ano de 2012 através de troca de conhecimentos e pesquisas com os institutos eslovenos, pioneiros no assunto. Este artigo apresenta a linha temporal sobre o histórico do B-WIM no Brasil e no mundo e também detalha algumas particularidades do sistema como, os procedimentos, os softwares, as metodologias utilizadas e as pesquisas em andamento. Outro ponto vislumbrado é o desenvolvimento do sistema B-WIM brasileiro para avaliação da capacidade resistente de pontes e viadutos aliado à identificação e classificação da frota de veículos brasileira

*Palavras Chaves: B-WIM; Strain gauges; Calibração; Linha temporal; Brasil.*

## 1. Introdução

O segmento rodoviário, de forma mundial, é o maior responsável pelo transporte de cargas em um país. No Brasil, por exemplo, 61% da carga é transportada de forma terrestre, sendo também o principal modo de deslocamento de passageiros, independente da distância percorrida [1]. Como forma de assegurar o desempenho satisfatório de pavimentos e de toda a infraestrutura rodoviária, além das ações de manutenção e restauração, surgem ações preventivas como o controle de cargas. Graças a esta grande influência no setor logístico, o controle de cargas se faz essencial de modo a evitar danos no pavimento e em obras da infraestrutura rodoviária.

Como forma de monitoramento de cargas na superestrutura de pontes e viadutos e também no mapeamento dos veículos atuantes, surge em 1970 o sistema de pesagem em movimento em pontes, denominados *Bridge Weigh-in-Motion*, B-WIM [2]. O processo de pesagem dá-se pela transformação estimativa das cargas dinâmicas dos pneus de um veículo em cargas estáticas através do seu peso bruto total e também pelas cargas por eixo. Para a coleta de informações de monitoramento, sensores são instalados nas longarinas e no tabuleiro da estrutura, sendo responsáveis por medir as deformações geradas na passagem dos veículos pesados [3]. O uso da tecnologia B-WIM surge como forma de identificar e monitorar as estruturas cujos níveis de resistência estejam próximos aos seus níveis de solicitação limite, atuando como um provável norteador na tomada de decisão sobre o dispêndio de recursos em ações de intervenção como manutenção e recuperação.

Este artigo tem como intuito informar as características, vantagens/desvantagens, aplicações, metodologias e o histórico dos sistemas B-WIM no mundo, e como essas informações embasaram as pesquisas existentes hoje no Brasil

## 2. Condição estrutural de pontes e viadutos de concreto

No Brasil, a partir do ano de 1960, teve grande expansão a construção de rodovias e da infraestrutura que compõem todo o sistema, como pontes e viadutos de concreto. O processo de dimensionamento destas estruturas considerou o volume de tráfego e os processos construtivos da época que, quando relacionados com os procedimentos utilizados atualmente, podem ser considerados defasados. A justificativa para esta defasagem de informação, segundo [4] é de que os modelos de carga utilizados pelas normas brasileiras no dimensionamento de pontes e viadutos, não reproduz o tráfego real de

veículos solicitantes. Assim, por vezes, a segurança do usuário que acessa a estrutura pode estar comprometida.

O monitoramento das estruturas de concreto pode ser realizado através de inspeções que tem como finalidade avaliar a condição da estrutura e sua capacidade resistente [5]. Um dos indicadores de desempenho de pontes e viadutos mais utilizados é o representa o índice de condição que segundo [6] é obtido principalmente por inspeção visual da estrutura. Durante estas inspeções é possível observar a necessidade de reparos de pequena e grande magnitude nas estruturas bem como a condição de segurança que a mesma apresenta. No Brasil a norma regulamentadora que define os critérios de avaliação durante vistorias é a DNIT-PRO 010 [7], a partir da aplicação desta norma, são definidos relatórios que elencam o nível de restauração necessário na estrutura.

O procedimento de inspeção em pontes e viadutos atribui notas às estruturas de modo a classificar a necessidade de restauração e sua condição estrutural. Segundo [8], sistemas de gerenciamento de dados de pontes e viadutos são capazes de armazenar dados históricos bem como, características provenientes de inspeções, projetos, modelos de dimensionamento e deterioração de modo a orientar decisões a nível de rede ou de projeto.

O sistema de gerenciamento de dados pode ser realizado a partir de diversos critérios de priorização. Países como China, Coréia do Sul e Japão, segundo [9], avaliam a condição de impacto, probabilidade de risco, o volume de tráfego incidente e a condição da estrutura de modo a estabelecer a partir da avaliação conjunta destes critérios as técnicas de manutenção necessárias e seu período de aplicação. A metodologia de gerenciamento utilizada pelos Estados Unidos, leva em consideração critérios de classificação do estado de condição da estrutura e na ponderação de fatores determinantes de infraestrutura como a conforto, segurança e serventia [10].

No Brasil, a avaliação subjetiva das estruturas é determinada com base no Sistema de Gerenciamento de Obras de Artes Especiais (SGO), desenvolvido e alimentado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, e norteada pelas normas DNIT-PRO 010 [7] e NBR-9452/2016. No momento da vistoria, para cada elemento componente da estrutura é atribuída uma nota de avaliação, e corresponde à maior ou à menor gravidade da patologia existente no elemento, respectivamente. A partir destas notas também são apresentadas as condições de estabilidade da estrutura, a ação corretiva que deve ser realizada e em que período de tempo e também uma classificação das condições da estrutura no que tange à segurança do usuário ao trafegar. A nota técnica final da estrutura será igual à menor nota recebida aos elementos com função estrutural individualmente. Dessa forma, pontes e viadutos com notas mais baixas são as que possuem pelo menos um elemento estrutural em condição precária ou sofrível, sendo passível de maior atenção e, possivelmente, de manutenção imediata.

Após o levantamento das condições da estrutura, são realizadas abordagens de modo a prever o comportamento quanto à deterioração. Para esta análise podem ser utilizados modelos categorizados em métodos mecanicistas ou empíricos. Os modelos mecanicistas envolvem modelos analíticos enquanto os empíricos fazem uso de dados experimentais e aplicações em campo. Estes modelos, segundo [11], podem ser classificados também como de inteligência determinística e estocástica. Modelos determinísticos se tornam mais diretos e capazes de prever futuras condições da estrutura e são obtidos a partir de um processo de regressão para parâmetros, e modelos estocásticos avaliam a deterioração da estrutura utilizando variáveis aleatórias e atribuindo probabilidade de ocorrência de um ou mais estados específicos no espaço amostral.

A aplicação de modelos empíricos mecanicistas é capaz de avaliar de forma conjunta as condições reais das estruturas e vincular estas à modelos normatizados como forma de prever seu comportamento. Segundo [12], quando aplicados em pontes e viadutos, estes sistemas são capazes de avaliar de forma conjunta as informações de tráfego como, quantidade de veículos e seus respectivos pesos, velocidade de tráfego e configuração da frota juntamente com as respostas das estruturas à cada passagem. Assim, é possível monitorar de forma eficaz o desempenho de cada estrutura à solicitação de carga e sua configuração pontual e global. Como forma de obtenção de dados reais e que consigam vincular as condições de segurança de pontes e viadutos ao tráfego a que são expostas, foi desenvolvido o sistema de pesagem em movimento em pontes, mundialmente conhecido como *Bridge Weigh-in-Motion*, B-WIM.

### 3. Linha temporal dos sistemas B-WIM

Os estudos a respeito da tecnologia de pesagem em movimento em pontes, *Bridge Weigh-in-Motion* tiveram início durante a década de 1970. O aperfeiçoamento destes estudos ocorreu com o envolvimento das cargas geradas pelos veículos sobre as estruturas através de um algoritmo desenvolvido por Fred Moses em 1979. Com base no algoritmo, outros estudos foram desenvolvidos

como forma de melhorar o entendimento sobre as variáveis, mesmo que por vezes não contemplassem em totalidade as funções do B-WIM [2].

Na Austrália, por exemplo, tem-se o sistema CULWAY desenvolvido por [13] em uma versão simplificada desenvolvida para a instrumentação de viadutos, entretanto, com limitações na detecção de peso por eixo. Entre os anos de 1995 e 1998 através do WAVE as pesquisas europeias expandiram o uso de múltiplos sensores e o desenvolvimento de algoritmos para sua melhor acurácia e automatização da pesagem veicular, destacando-se a instrumentação de pontes e viadutos com os sensores de fibra ótica [14]. A especificação [15], proporcionou grande evolução nos ciclos de desenvolvimento e de testes do sistema de pesagem em movimento para fiscalização de peso tanto em pavimentos quanto em pontes e viadutos. O programa SiWIM, desenvolvido na Eslovênia, utiliza o algoritmo de Moses no que diz respeito à detecção de eixos e faz uso de sistemas de algoritmos de otimização de dados para melhor entendimento e apresentação dos resultados.

Com o interesse de testar e inserir essa tecnologia no Brasil, em 2007 foi firmada parceria entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o Instituto ZAG, antes dessa data, estudos pontuais realizaram coletas de dados com instrumentação em pontes brasileiras. No ano de 2012, o Brasil deu início ao avanço nos estudos utilizando o software SiWIM, através da instrumentação de um viaduto com 16 sensores *strain gauges*, localizado na região sul do país [2]. Em função do Brasil não possuir até este ano uma metodologia de avaliação de segurança, as normativas eslovenas aplicadas por [2] e o código [16] foram utilizados como norteadores. Entre os anos de 2014 e 2016, outras três pontes foram instrumentadas e monitoradas na região central do país. Com base nesses dados coletados e no monitoramento iniciou-se o desenvolvimento de uma metodologia de inspeção e avaliação de segurança de pontes e viadutos.

No ano de 2019, foi instrumentado no Brasil, com 32 sensores de deformação (*strain gauges*), um viaduto de concreto armado localizado na região sul do país em uma rodovia federal de elevado volume de tráfego. A coleta de dados desta instrumentação encontra-se em atividade no momento e, ao final do experimento, o Brasil contará com uma metodologia própria para inspeções utilizando o sistema B-WIM. No decorrer dos anos, a tecnologia de pesagem em movimento em pontes e viadutos, B-WIM, foi sendo aperfeiçoada de modo a conferir eficácia no sistema e acurácia dos dados e informações obtidas. A Figura 1 apresenta a linha temporal no que diz respeito à pesagem em movimento em ponte no Brasil e no mundo.

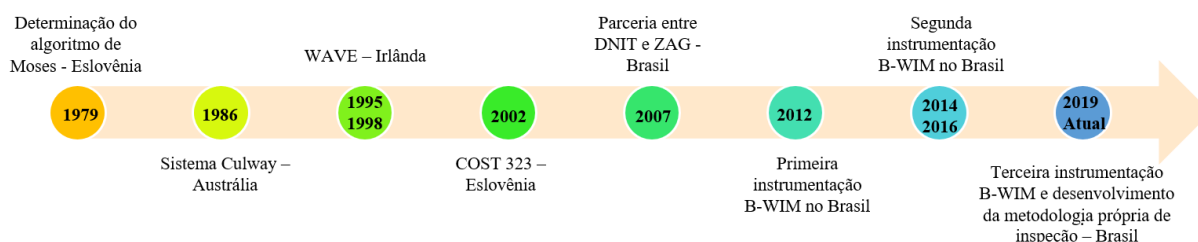


Figura 1. Linhas temporal da evolução dos estudos utilizando B-WIM

#### 4. Aplicação e desenvolvimento dos sistemas B-WIM

Para os estudos com a utilização de B-WIM, são necessárias etapas importantes como instrumentação com sensores e a calibração do sistema. Estas etapas são responsáveis pela eficácia na obtenção dos dados e no processo de avaliação da condição estrutural e representação do tráfego incidente.

##### 4.1. Processo de instrumentação dos sensores B-WIM

A instrumentação consiste na fixação de um número pré-estabelecido de extensômetros na parte inferior da plataforma das estruturas, os quais são responsáveis por coletar os sinais gerados pela passagem dos veículos. Segundo [12], os sensores devem ser instalados em pontos estratégicos da estrutura, definidos a partir da linha de influência da estrutura e nas sessões que correspondam aos maiores esforços. Os sensores geralmente são fixados na estrutura utilizando ancoragem mecânica, que necessitam de precisão em relação ao posicionamento e no tipo de fixação. Segundo [17], caso um sensor seja instalado sobre fissuras, os resultados de deformações obtidos podem ser majorados

em até 4 vezes, enquanto que fissuras próximas ao sensor podem fazer com que este apresente-se com  $\frac{1}{4}$  do valor esperado. [18] apresentam que esta variação nos valores de deformações obtidas é relacionada ao fato dos sensores serem extremamente sensíveis e capazes de captar inclusive as movimentações patológicas internas do concreto.

Em sua grande maioria, são utilizados no processo de instrumentação, extensômetros de resistência elétrica (*strain gauges*). Estes extensômetros embora apresentem capa metálica, capaz de proteger seu interior, podem ter seu desempenho afetado pela presença de água e interferência eletromagnética. Como vista a aprimorar estes sistemas, surgem os sensores de fibra ótica também para implementação em sistemas B-WIM [19]. Estes sensores possuem larga aplicação em sítios de sistemas WIM quando são instrumentados na superfície da camada de revestimento de pavimentos asfálticos e de concreto.

Testes utilizando os dois tipos de sensores foram desenvolvidos por [20] onde o desempenho foi avaliado utilizando quatro testes sequenciais. Os resultados apontaram que sensores de fibra ótica são mais adequados para este tipo de sistema, embora possam não oferecer alta acurácia em elevadas taxas de escaneamento. Em contra partida, apresentam durabilidade elevada quando comparados com os extensômetros de resistência elétrica, os *strain gauges*.

#### 4.2. Processo de calibração dos sensores B-WIM

O processo de calibração é uma das etapas mais importantes durante a instalação do sistema de monitoramento, pois é durante esse processo que se obtém a Linha de Influência (LI) real da ponte, necessária para realizar a correta pesagem dos veículos e para executar a posterior avaliação da segurança da ponte. Como exemplo da aplicação do processo de calibração, [18], realizaram o cálculo da LI através do método B-WIM, com a seleção dos veículos de forma aleatória e utilizando o tráfego real da via, assim, tendo carga de eixo desconhecida. Os autores tinham como objetivo representar se o desenvolvimento da linha de influência segue o mesmo perfil também quando não há seleção dos veículos de calibração. Como resultado, o ponto máximo de uma linha de influência para condições reais tem forma arredondada, cujo raio corresponde, aproximadamente, à espessura da superestrutura da ponte ou viaduto instrumentado, como mostra a Figura 2.

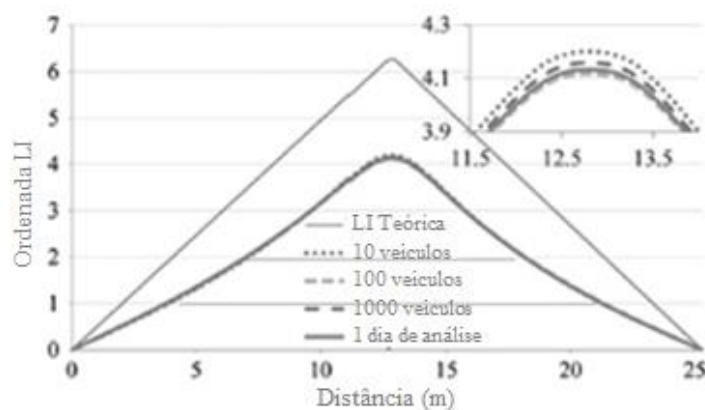


Figura 2. Adaptado de [18]

Durante o procedimento B-WIM desenvolvido no Brasil entre os anos de 2014 e 2016, para o processo de calibração foram utilizados dois caminhões com dimensões e PBT conhecidos, um rígido de 3 eixos (3C) com PBT de 26,41 toneladas e outro articulado semirreboque de 5 eixos (2S3) com PBT de 36,81 toneladas, testados em diversas velocidades. Decorrido o processo de calibração, os dados foram processados e a Linha de Influência (LI) real das pontes geradas. Conforme apresentado por [18], o ponto máximo da linha de influência real, a partir de monitoramento, apresenta formato arredondado, o que difere do cálculo teórico. As diferenças apresentadas por estas duas situações de linhas de influência dizem respeito aos esforços gerados pelos veículos sobre a estrutura. A Figura 3 apresenta as linhas de influência resultantes do processo de calibração da ponte instrumentada no Brasil entre os anos de 2014 e 2016.

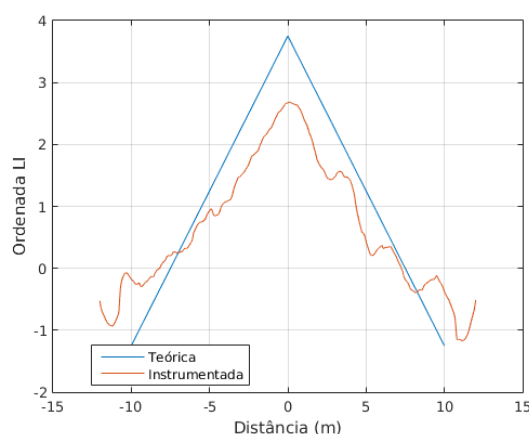


Figura 3. Linhas de influência teórica e real da instrumentação no Brasil

Conforme o estudo brasileiro, verifica-se a importância do processo de calibração para estimativa dos esforços, na qual a Figura 3 mostra a linha teórica com valores de esforços cerca de 40% superiores aos estimados na linha de influência real. Esta diferença pode comprometer os estudos de tráfego, assim como as análises sobre a resistência da estrutura.

O processo de detecção de veículos B-WIM é essencial para o correto funcionamento do software no que rege a quantificação do tráfego, a identificação do veículo e o controle de cargas. Os softwares B-WIM costumam apresentar na configuração padrão um nível de ativação de sinal para detecção de eixos dos veículos, na qual o sistema de aquisição de dados seleciona somente os sinais que ultrapassam este nível pré-estabelecido. [18], citam a necessidade do melhoramento no processamento do sinal durante a calibração no que diz respeito à reconstrução dos sinais perdidos e a combinação de diferentes técnicas, como a amplificação dos picos para detecção de eixos. Para que a falha no sistema de detecção de eixos seja minimizada, estudos de [17] e [18] sugerem que os sensores sejam instalados no tabuleiro, entre as longarinas da ponte ou do viaduto e que assim captem os maiores sinais de deformação gerados pela estrutura.

O sistema B-WIM no Brasil para o desenvolvimento de uma metodologia de inspeção e avaliação de segurança de pontes e viadutos ainda está em elaboração. Entretanto, já possui algumas configurações estabelecidas quanto à detecção de eixos dos veículos que trafegam sobre a estrutura instrumentada. O software considera que o momento em que um eixo passa sobre o sensor refere-se ao ponto intermediário da trajetória de deslocamento onde o sinal filtrado é maior do que o valor definido para o parâmetro *axle threshold percent*. Como alternativa, opta-se por usar o ponto máximo do intervalo ao invés do intermediário. O padrão adotado é de 10%, porém este pode passar por uma calibração como forma de melhorar o desempenho do sistema

## 5. Considerações finais

A tecnologia de sistemas B-WIM tem apresentado grande expansão nos últimos anos em função de diversas instalações e *softwares* para melhor entendimento do processo de análise. O Brasil caminha ao desenvolvimento de sua própria tecnologia uma vez em que diversas pontes e viadutos de concretos encontram-se próximos ao limite de sua vida de projeto. Este sistema, quando bem implementado, deve auxiliar a tomada de decisões no que diz respeito a definições de capacidade de carga admissível e intervenções para manutenções e restaurações estruturais.

O procedimento de instrumentação de sensores *strain gauges* em um viaduto de concreto tem como objetivo o completo entendimento sobre o comportamento da estrutura durante o tráfego de veículos, além da identificação e análise de toda a frota e sua classificação perante as normativas brasileiras de limite de carga por eixo. Este procedimento ainda se encontra em desenvolvimento, entretanto tem apresentado bons resultados, o que confere credibilidade ao seu pleno desenvolvimento. Os sensores permanecerão instrumentados durante o período de 12 meses para que a maior gama de variáveis possíveis seja identificada e compreendida de modo a auxiliar o desenvolvimento do sistema B-WIM brasileiro.

Neste momento é notória a importância dos conceitos que envolvem o ineditismo da tecnologia e os desafios para sua ampla implementação após completa análise. O sistema de gerenciamento de pontes e viadutos através da tecnologia B-WIM no Brasil tem como intuito também o de auxiliar o Governo

Federal quanto à tomada de decisão sobre os procedimentos de manutenção e restauração, necessário para assegurar a segurança e conforto do usuário. A medida em que o sistema for desenvolvido de forma satisfatória e confiável, os resultados serão publicados de modo a difundir o sistema B-WIM brasileiro mundialmente.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através do Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), pelo acesso aos dados dos estudos e pesquisas.

## Referencias

- [1] CNT. Confederação Nacional do Transporte. Transporte Rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos. Brasília, 2017.
- [2] MOSES, Fred. Weigh-in-motion system using instrumented bridges. ASCE Transp. Eng. J., v. 105, n. 3, p. 233-249, 1979.
- [3] ZAG, Zavod za gradbeništvo Slovenije, "Report No. P 670/220/09-01 on SiWIM Measurements and Soft Load Testing Results on Palhoça Bridge in Santa Catarina, Brazil". Department for Structures. Ljubljana, Eslovênia. 2012.
- [4] Rossigali, C. E.; Pfeil, M. S. Battista; R. C. Sagrilo, L. V. (2015) Towards actual brazilian traffic load models for short span highway bridges. Rev. IBRACON Estrut. Mater., v. 8, n. 2, p. 124–139.
- [5] Vitorio, J. A. P. (2015) Uma Contribuição ao Estudo da Avaliação da Segurança de Pontes Existentes, Rio de Janeiro, v. jul. /dez, Volume 15.
- [6] Strauss, A.; Mandićvanković, A.; Matos, J.C. e Casas, J.R. (2017) Performance Indicators for Road Bridges Overview of Findings and Future progress. The Value of Structural Health Monitoring for the reliable Bridge Management. TU1406 Cost Action. March. Zagrebe, Croácia.
- [7] Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes (2004). DNIT-PRO 010 - Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento. Rio de Janeiro.
- [8] Cavalline, T. L., Whelan, M. J., Tempest, B. Q., Goyal, R., & Ramsey, J. D. (2015). Determination of Bridge Deterioration Models and Bridge User Costs for the NCDOT Bridge Management System. North Carolina.
- [9] Matos, J.C.; Casas, J.R. e Fernandes, S. (2016) TU-1406 Cost Action Quality Specifications for Roadway Bridges (BridgeSpec). 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Foz do Iguaçu, Brasil.
- [10] DA SILVA, M. B. M. F.; DE MELO, R. A., (2019). PARÂMETROS FUNCIONAIS EM OAE'S: CONDIÇÕES DE PONTES RODOVIÁRIAS. 33º ANPET.
- [11] Oliveira, C. B. L.; Greco, M.; Bittencourt, T. N. Analysis of the brazilian federal bridge inventory. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, n. 1, p. 1-3, 2019.
- [12] Magalhães, A. C. L., Junges P., Pinto R. C. A., Valente A. M., (2019). Esforços provenientes do tráfego para avaliação de segurança de pontes existentes a partir de monitoramento B-WIM. Revista IBRACON.
- [13] Peters, R. J. CULWAY – An unmanned and undetectable highway speed weighing system (pp. 70–83). Melbourne: Proceedings of the 13th ARRB Conference. 1986.
- [14] Jacob, B. Assessment of the accuracy and classification of weigh-in-motion systems. Part 1: Statistical background. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 7(2), 136–152. 2000.
- [15] COST 323. Weigh in motion of road vehicles. Final Report, Appendix 1 European WIM Specification, LCP publication, Paris, 2002.
- [16] EM 1991 - Eurocode 1, 2009. Actions on structures, Part 2: Traffic loads on bridges.
- [17] Žnidarič, A., Turk, G., & Zupan, E. Determination of strain correction factors for bridge weigh-in-motion systems. Engineering Structures, 102, 387-394. 2015.
- [18] Žnidarič, A., Kalin, J., & Kreslin, M. Improved accuracy and robustness of bridge weigh-in-motion systems. Structure and Infrastructure Engineering, 14(4), 412-424. 2018.
- [19] Chen, S. Z., Wu, G., & Feng, D. C. (2019). Development of a bridge weigh-in-motion method considering the presence of multiple vehicles. Engineering Structures, 191, 724-739.
- [20] Lydon, M., Taylor, S. E., Robinson, D., Callender, P., Doherty, C., Grattan, S. K., & O'Brien, E. J. (2014). Development of a bridge weigh-in-motion sensor: performance comparison using fiber optic and electric resistance strain sensor systems. IEEE Sensors Journal, 14(12), 4284-4296.