UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

José Alves de Carvalho Neto

PESAGEM EM MOVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO FERROVIÁRIO COM USO DA TÉCNICA B-WIM

Orientador: Luis Augusto Conte Mendes Veloso, Dsc.

BELÉM

2014

PESAGEM EM MOVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO FERROVIÁRIO COM USO DA TÉCNICA B-WIM

JOSÉ ALVES DE CARVALHO NETO

Engenheiro Civil

Universidade Federal do Pará, 2011

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, na área de concentração Estruturas e Construção Civil, em cumprimento às exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dsc. Luis Augusto Conte Mendes Veloso

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL (ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL)

BELÉM – PARÁ – 2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Carvalho Neto, José Alves de, 1987-
Pesagem em movimento e caracterização do trafego ferroviario com uso da técnica B-Wim / José Alves de Carvalho Neto. - 2014.

Orientador: Luis Veloso.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2014.

1. Engenharia civil. 2. Engenharia de estruturas. 3. Locomotivas - Medição. I. Título.

CDD 23. ed. 624

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PESAGEM EM MOVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO FERROVIÁRIO COM USO DA TÉCNICA B-WIM.

AUTOR:

JOSÉ ALVES DE CARVALHO NETO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA EM: 26/02/2014

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. LUIS AUGUSTO CONTE MENDES VELOSO
Orientador

Prof. Dr. MAURICIO DE PINA FERREIRA
Membro Interno

Prof. Dr. RONALDSON JOSÉ DE FRANÇA MENDES CARNEIRO
Membro Externo

Prof. Dr. ZACARIAS MARTIN CHAMBERLAIN PRAVIA
Membro Externo

Visto:

Prof. CLAUDIO JOSÉ CAVALCANTE BLANCO, Ph.D
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a agradeço Deus. A todos os que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho. Especialmente agradeço:

Ao orientador professor Luis Augusto Conte Mendes Veloso, pelos ensinamentos transmitidos desde a iniciação científica até o trabalho presente, pela orientação e empenho demonstrado para o ensino. Sua confiança em minha pessoa para realizar esse estudo. E por ser um amigo-orientador.

Ao professor Eurípedes Santos nos importantíssimos conselhos e ensinamentos referentes a programação.

Aos amigos do LABDID: Adauto César Rodrigues, Adriana Rolim, Anderson Leal, Dennis Pureza, Fábio Ilan, João Felipe Melo, Jouberson Moreira, Maurício Gomes, Rodrigo Peixoto, Romulo Lopes, Thiago Barroso e Thiago Batista pela amizade e pelas inúmeras histórias e estórias que temos para contar durante nosso período de pesquisa e do conhecimento adquirido juntos no Laboratório Didático.

Às amizades conquistadas durante o período de pesquisas no LEC (PET e GAEMA) e no NICAE.

Aos demais professores do PPGEC pela disponibilidade dos seus conhecimentos.

À minha namorada Keith Furtado pelo incentivo e companheirismo.

À minha família que sempre teve confiança em mim e esteve ao meu lado em todos os momentos.

CARVALHO NETO, José Alves de, Pesagem em Movimento e Caracterização do Tráfego Ferroviário com uso da Técnica B-WIM. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

RESUMO

Nesta dissertação é apresentado o desenvolvimento de algoritmos para aplicação do método Bridge-Weigh In Motion (B-WIM) para a pesagem em movimento de trens e para a caracterização do tráfego ferroviário, permitindo-se obter informações sobre a velocidade de passagem dos trens, número e espaçamento entre eixos. Os sistemas B-WIM a partir de uma simples instrumentação permitem determinar as cargas por eixo de veículos em movimento, eliminando o efeito dinâmico. Foram implementados os algoritmos para a determinação dos valores referentes a geometria do trem e das cargas, que foi validado a partir de um exemplo teórico, onde se simulou a passagem de um trem de características conhecidas sobre a ponte e as cargas por eixos foram determinadas com 100% de exatidão. Além disso, foi feito um exemplo numérico em elementos finitos, de um viaduto em concreto armado para aplicação do método, onde foi feita a determinação das cargas por eixo para diferentes velocidades de passagem do trem. A fim de reduzir o tempo de processamento nas análises do exemplo numérico, foi desenvolvido um algoritmo para a geração de cargas nodais no modelo numérico que reduziram o tempo de processamento em até 96% quando comparado com a análise de múltiplos passos (“Multi-Step”), que simula automaticamente a passagem do trem sobre a estrutura. Finalmente, o método foi testado em um caso real a partir de monitorações realizadas em um viaduto de concreto armado da Estrada de Ferro Carajás. Apesar de não ter sido possível a determinação das cargas por eixo da locomotiva, foi possível medir precisamente o peso bruto total da locomotiva quando se utilizou o modelo constitutivo de Collins & Mitchell (1991) para o concreto.

Palavras-chave: Pesagem em Movimento em Pontes; Caracterização do tráfego; Algoritmo de Moses.

CARVALHO NETO, José Alves de, Weighing in Motion and Characterization of the Rail Traffic with using the Technique B-WIM. 2014. 101 p. Master's Thesis (Master in Civil Engineering) – Graduate Course in Civil Engineering, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

ABSTRACT

This Master's Thesis presents the development of algorithms for application of Bridge-Weigh In Motion (B-WIM) for weighing moving trains and method for the characterization of rail traffic, allowing up to obtain information about the speed of passage of trains , number and axle spacing. The B-WIM systems from a simple instrumentation for determining the axle loads of moving vehicles, eliminating the dynamic effect. The algorithms for determining the values related the geometry of the train and axle loads were implemented, which was validated from a theoretical example, where we simulated the passage of a train of known characteristics over the bridge and axle loads were determined 100% accuracy. In addition, a numerical example was done in finite element method, of a reinforced concrete viaduct for application of the method, where was determine axle loads for different speeds of train passage. In order to reduce the processing time of the analysis in the numerical example, an algorithm for generating the numerical model nodal loads was implemented that have reduced processing time by 96% compared to the analysis of multi-step, which automatically simulates the passage of the train over the structure. Finally, the method was tested on a real case from monitoring tests realized on a reinforced concrete viaduct in the Carajás Railroad. Although it was not possible to determine the axle load locomotive, it was possible to measure accurately the gross weight of the locomotive when using the constitutive model of Collins and Mitchell (1991) for concrete.

Keywords: Weighing in Motion; B-WIM; Traffic Characterization; Moses Algorithm.

Sumário

1 Introdução 1

1.1 Justificativa 4

1.2 Objetivos 5

1.3 Apresentação do Texto 5

2 Determinação Experimental de Cargas Móveis (Algoritmo de Moses) 7

2.1 Algoritmo B-WIM 9

2.2 Histórico de Pesquisas sobre o Sistema B-WIM 13

2.3 Determinação Experimental da Linha de Influência 15

3 Implementação e Validação por Intermédio de um Exemplo Numérico 23

3.1 Descrição do Viaduto 23

3.2 Validação Teórica do Algoritmo de Moses (1979) 24

3.3 Descrição do Modelo Numérico 26

3.4 Análise Modal 27

3.5 Algoritmo para Geração de Cargas Móveis 29

3.5.1 “Função Inicial” 31

3.5.2 “Função Intermediária” 32

3.5.3 “Função Final” 33

3.6 Análise “Time History” 34

3.7 Obtenção das séries Temporais de Momento Fletor 36

3.8 Geração da Linha de Influência 38

3.9 Determinação das Cargas 39

4 Caracterização e Pesagem de um Componente de um Veículo a partir de Dados Experimentais 43

4.1 Determinação das propriedades mecânicas do concreto 43

4.1.1 Preparação da amostra 43

4.1.2 Procedimento de ensaio 44
4.1.3 Resultados obtidos 45
4.2 Instrumentação do Viaduto 47
4.3 Aquisição de Dados 48
4.4 Determinação da Geometria do Trem 48
4.4.1 Filtragem do Sinal dos Extensômetros no Trilho 49
4.4.2 Detecção dos Picos 50
4.4.3 Cálculo da Velocidade e das Distâncias entre Eixos 51
4.5 Obtenção da Série Temporal de Momento Fletor 52
4.5.1 Filtragem do Sinal dos Extensômetros na Longarina 52
4.5.2 Modelos Constitutivos para os materiais 53
4.6 Determinação das Cargas por Eixo e do Peso Bruto Total 59
5 Conclusões 61
Sugestões para trabalhos futuros 62
Referências 63
Referências Citadas 63
Referências Não Citadas 65
Anexos 68

Lista de Figuras

Figura 1.1 – a) Célula de Carga; b) Plataforma estacionária; c) Báscula portátil (com célula de carga) 2
Figura 1.2 – Métodos WIM: a) Medições no pavimento, WIM; b) B-WIM, sistema como todo (Znidaric e Baumgärtner, 1998 *apud* Quilligan, 2003) 3
Figura 1.3 – Esquema do sistema Trainweigh desenvolvido pela Toledo do Brasil (2005) . 4
Figura 2.1 – Corte transversal do tabuleiro analisado e arranjo da instrumentação (Moses, 1979 *apud* Pimentel, 2008) 10
Figura 2.2 – Planta do tabuleiro analisado e esquema de veículo genérico (Moses, 1979 *apud* Pimentel, 2008) 10
Figura 2.3 – Localização dos eixos ao longo da ponte 10
Figura 2.4 – Linha de influência de momento fletor no meio do vão para uma viga bi apoiada 11
Figura 2.5 – Sistema B-WIM ("Culway") (Tierney et al., 1996) 13
Figura 2.6 – a) Ponte de Ärstaberg; b) Esquema da instrumentação na via (Karoumi et al., 2005) 14
Figura 2.7 – a) Vista geral da ponte de Canelas; b) Esquema de instrumentação usado na monitoração (Pimentel, 2008) 15
Figura 2.8 - Linha de influência de momento fletor em uma seção de uma viga contínua . 16
Figura 2.9 - Linhas de influência do momento fletor para estruturas bi apoiada e engastada (Znidaric e Baumgärtner, 1998) 17
Figura 2.10 – Erros nos pesos para duas pontes devido a escolha errada da linha de influência. (Znidaric e Baumgärtner, 1998) 17
Figura 2.11 – Resposta medida a partir da passagem do veículo de calibração com 3 eixos, com a linha de influência requerida para ser calculada. O número de ordenadas de linha de influência é igual a $K - C3$ (Znidaric e Baumgärtner, 1998) 19
Figura 3.1 – a) Vista geral do Viaduto sobre a CFN 1ª travessia (VALE, 2003); b) Sistema estrutural da OAE 01 (VALE, 1978); c) Meia seção transversal do viaduto 24
Figura 3.2 – Linha de Influência da Viga Principal 25
Figura 3.3 – Cargas por Eixo do trem-tipo utilizado na validação teórica do algoritmo 25
Figura 3.4 – Série temporal de momentos fletores no meio do vão. 26
Figura 3.5 – Modelo numérico da OAE 01 27

Figura 3.6 – a) 1º Modo de flexão vertical (f=8,42 Hz); b)2º Modo de vibração de flexão vertical (f=30,21Hz) 29
Figura 3.7 – a) Desenho esquemático da Locomotiva DASH-9; b) Desenho esquemático do Vagão GDT. Unidades em mm (VALE, 2009) 30
Figura 3.8 – Função inicial de um eixo no primeiro ponto "nó" de uma ponte de um vão bi apoiada 31
Figura 3.9 - Função intermediária de um eixo no segundo "nó" de uma ponte de um vão bi apoiada 32
Figura 3.10 - Função final de um eixo no último "nó" de uma ponte de um vão bi apoiada 33
Figura 3.11 - Fluxograma relativo ao algoritmo "Calcula_TimeHistory" 34
Figura 3.12 – Arranjo de 2 locomotivas e 4 vagões adotado 35
Figura 3.13- Comparação dos tempos das análises no SAP2000® 36
Figura 3.14 - Séries temporais de momentos fletores. a) Série obtida a partir da análise "Multi-Step"; b) Série obtida a partir da análise "Time History". 37
Figura 3.15 – Séries temporais filtradas do momento fletor na longarina para a passagem do trem 38
Figura 3.16 – a) Linhas de influências obtidas para várias velocidades para uma ponte de 18,25 m de comprimento; b) Linha de influência obtida e curva da linha de influência gerada 39
Figura 3.17 – Cargas por eixo obtidas para a passagem do trem 40
Figura 3.18 – Erros relativos de cargas por eixo obtidos para a passagem do trem 42
Figura 4.1 – Vista geral do Viaduto sobre a CFN 1ª travessia (VALE, 2003) 43
Figura 4.2 – a) Processo de marcação do testemunho para se alcançar a altura requerida de 20 centímetros. b) Corte das faces irregulares (NICAE, 2009) 44
Figura 4.3– Diagrama de carregamento (ABNT NBR 8522/2008) 44
Figura 4.4– Extensômetros tipo "clip-gage" fixado no corpo-de-prova (NICAE, 2009) 45
Figura 4.5 – Resultados obtidos para o testemunho retirado do encontro E1. a) Diagrama da tensão-tempo; (b) Diagrama tensão-deformação (NICAE, 2009) 46
Figura 4.6 – Resultados obtidos para o testemunho retirado do encontro E2. a) Diagrama da tensão-tempo; b) Diagrama tensão-deformação (NICAE, 2009) 46
Figura 4.7 – Resultados obtidos para o testemunho retirado da laje. a) Diagrama da tensão-tempo; b) Diagrama tensão-deformação (NICAE, 2009) 47
Figura 4.8 – EER's fixados nos trilhos e nas longarinas 48

Figura 4.9 – Esquema do arranjo para aquisição dos dados utilizados 48
Figura 4.10 – a) Série temporal de deformações para um extensômetro fixado no trilho não tratado e tratado com uso da Média Móvel Simples (MMS); b) aproximação na série temporal para percepção entre o uso ou não da MMS 49
Figura 4.11 – Picos obtidos dos sinais de deformação no trilho. a) EER fixado para o lado de São Luis; b) EER fixado para o lado de Carajás 50
Figura 4.12 – Velocidade por eixo obtida para uma série temporal devido a passagem de uma locomotiva DASH-9 51
Figura 4.13 – Sinal de um extensômetro tratado com uso da Média Móvel Simples (MMS). Em verde Sinal Original (não tratado) e azul Sinal com Média Móvel (tratado)..... 53
Figura 4.14 – Diagrama tensão-deformação idealizado (ABNT NBR 6118, 2007) 54
Figura 4.15 – Diagrama tensão-deformação do aço para concreto armado. 57
Figura 4.16 – Distribuição das deformações ao longo da altura da seção (Pureza, 2013) .. 58
Figura 4.17 – Seção transversal discretizada em camadas com as barras de aço..... 58
Figura 4.18– Fluxograma para o cálculo e armazenamento dos esforços solicitantes experimentais..... 59
Figura 4.19 – Séries temporais de momento fletor obtidas para meia-seção. a) Com a equação da ABNT NBR 6118/2007; b) Com a equação de Collins e Mitchell (1991)..... 59
Figura 4.20 – Cargas por eixo da locomotiva. a) Equação. da ABNT NBR 6118/2007; b) Equação. de Collins e Mitchell (1991) 60

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Cargas por eixo do trem determinados pelo algoritmo na validação teórica .. 26
Tabela 3.2 – Propriedades da viga e do trilho 27
Tabela 3.3 – Propriedades dos dormentes e lastro..... 27
Tabela 3.4 – Frequências naturais obtidas..... 28
Tabela 3.5 – Cargas das locomotivas e vagões (VALE, 2009) 30
Tabela 3.6 – Tempos de análises no SAP2000®..... 35
Tabela 3.7 – Frequências relacionadas à distância entre eixos do trem para as velocidades de tráfego 36
Tabela 3.8 - PBT's obtidos para análise "Time History" e erros em relação ao PBT e médio por eixo 41
Tabela 4.1– Resultados obtidos para o módulo de elasticidade e resistência do concreto (NICAE, 2009) 47
Tabela 4.2 – Comparação entre as distâncias entre eixos reais e obtidas..... 52
Tabela 4.3 – Comparação dos PBT's obtidos e o real de uma locomotiva 60

1 Introdução

Uma nova rota para o escoamento da produção de minério está em fase de estudos no Pará, com o prolongamento da Ferrovia Norte-Sul que vai ligar o município de Açailândia, no Maranhão, ao Porto de Vila do Conde, em Barcarena, no nordeste paraense. O empreendimento irá potencializar ainda mais a economia do estado, por causa do aumento do escoamento da produção e extração de minério de ferro, nos municípios de Paragominas e Rondon do Pará. Com a criação do Plano Nacional de Ferrovias pelo governo federal em agosto de 2012, EPL (2012), os caminhos para que a economia do país pudesse contar com trens de cargas para escoar a produção foram reabertos.

O transporte ferroviário no Brasil ultimamente vem passando por um grande processo de desenvolvimento com a ampliação da Ferrovia Norte-Sul, (sétima maior obra de transporte em andamento no mundo) e o crescimento da extração de minério de ferro. Com essas melhorias, as ferrovias tendem a desenvolverem-se e diminuir a grande disparidade em relação ao transporte rodoviário, incluindo inclusive uma integração entre estes meios de transportes.

Do ponto de vista econômico, social e ecológico, os transportes ferroviários são a escolha mais sensata quando comparados com transportes rodoviários. Este fato verificasse tanto no que concerne ao movimento de pessoas, quer no que se refere ao transporte de mercadorias, Pimentel (2008). No que diz respeito à competitividade econômica dos veículos ferroviários, existe ainda outro fator preponderante, que está relacionado com as cargas que estes veículos podem comportar. Neste contexto, assume especial interesse o desenvolvimento de metodologias que permitam a aferição dos efeitos reais do tráfego nas estruturas ferroviárias, de modo a que no futuro seja possível, de uma forma relativamente simples, aumentar as cargas por eixo, bem como as velocidades de circulação, sem necessidade de grandes investimentos em infraestrutura.

A exigência para pesar veículos é algo pensado desde o século XVIII, quando o governo do Reino Unido introduziu o ato do pedágio, que decretou que as barreiras deveriam cobrar taxas para o uso de estradas de acordo com o peso do veículo. Uma balança de aço (steelyard) foi instalada, mas os veículos tinham que ser levantados para poder medir seu peso. Esse método que içava os veículos foi largamente aplicado e oi até a invenção da célula de carga, Figura 1.1-a, que os sistemas de alavanca complexos e volumosos foram substituídos. Os dois principais tipos de sistemas de pesagem estática em uso hoje

consistem da plataforma estacionária, Figura 1.1-b, e básculas portáteis, Figura 1.1-c. A precisão de ambos os sistemas os torna elegíveis para efeitos de aplicação.

Em contrapartida, a aquisição das informações dos eixos e peso bruto total dos veículos tem sido alvo de estudos pelo mundo desde a década de 70, quando houve um primeiro estudo de detecção de cargas por eixo e peso bruto total, de veículos em uma ponte rodoviária próxima a Cleveland, Ohio. Esse tipo de informação é essencial para o projeto de novas estruturas e manutenções das pontes, viadutos e do próprio pavimento das vias.

a)

b)

c)

Figura 1.1 – a) Célula de Carga; b) Plataforma estacionária; c) Báscula portátil (com célula de carga)

Os métodos de pesagem em movimento foram criados para fazer a determinação da carga por eixo e peso bruto total dos veículos durante as viagens em autoestradas, evitando a parada dos automóveis. Esses métodos foram denominados Weigh-in-Motion (WIM) e divididos em duas categorias baseados no tipo de instrumentação feita podendo ser no pavimento ou na ponte, conforme ilustradas na Figura 1.2. Por ter sido amplamente usado a categoria que instrumenta o pavimento da via foi usualmente chamado de WIM e o método de instrumentação na ponte de B-WIM (Bridge Weigh-in-Motion). A diferença

entre as duas categorias dá-se principalmente na instrumentação em que, o sistema do pavimento (WIM) tem sensores instalados no pavimento, perpendiculares ao sentido do tráfego, e de acordo com a variação da medição nos sensores é possível determinar a carga aplicada.

A categoria Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM) baseia-se nas leituras das deformações, a partir de extensômetros instalados paralelos ao sentido do tráfego de uma ponte, e o uso dessas leituras para determinar as características do tráfego na via, são essas o espaçamento entre eixos, velocidade, carga por eixo e peso bruto total.

a) b)

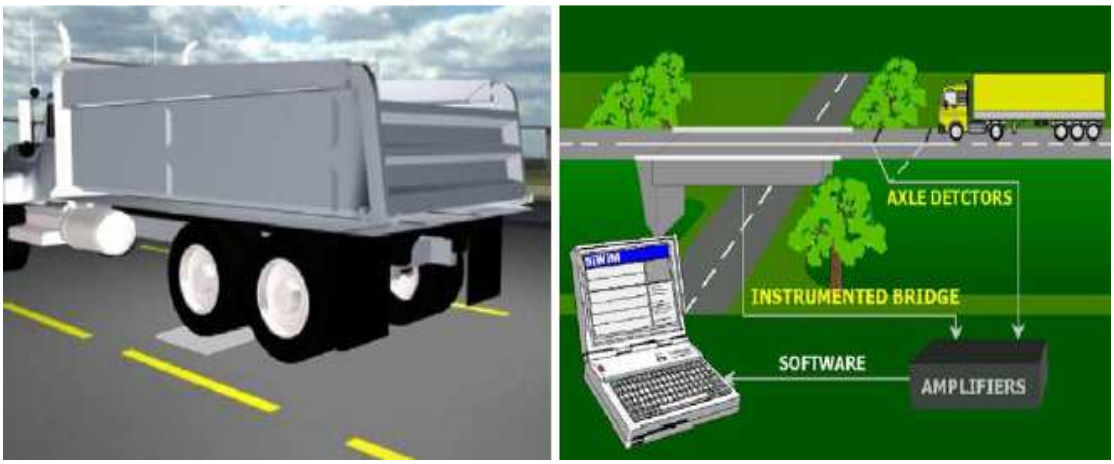


Figura 1.2 – Métodos WIM: a) Medições no pavimento, WIM; b) B-WIM, sistema como todo (Znidaric e Baumgärtner, 1998 *apud* Quilligan, 2003)

Comercialmente, há o sistema denominado de “Trainweigh” da empresa TOLEDO do Brasil (2005), que faz a pesagem estática ou em movimento. A Figura 1.3 apresenta um esquema do sistema que permite determinar as cargas por eixo a partir da leitura de extensômetros instrumentados em trilhos próprios instalados na via, que trabalham como balanças. O sistema permite determinar as cargas nos dois sentidos de passagem do trem, baixo custo de manutenção, fácil instalação e praticidade para mudança de local. Para pequenas composições (20 vagões), pode-se aplicar a pesagem estática. Para composições superiores, indica-se o uso da pesagem em movimento. Porém este método limita-se a velocidade máxima de 10 km/h, o que o inviabiliza seu uso para grandes composições com quilômetros de extensões, devido tempo excessivo de pesagem, o que altera a logística.

Figura 1.3 – Esquema do sistema Trainweigh desenvolvido pela Toledo do Brasil (2005)

1.1 Justificativa

Com a valorização do tempo, é essencial evitar perdas durante a movimentação de cargas para pesagem, de modo que não ocorram prejuízo e mudança de logística. A pesagem em movimento atende totalmente a essa necessidade do mercado e ainda permite um controle da quantidade de carga transportada.

Sabendo da dificuldade de se ter um controle da pesagem presente nos vagões e ausência de caracterização do tráfego ferroviário, um sistema dinâmico de pesagem permite a solução desses problemas. Com o uso do sistema WIM (Weigh-in-Motion) é possível medir o peso do veículo e seus eixos durante o tráfego na via, auxiliando a logística, por não necessitar que o trem pare. Outro sistema que existe é um princípio de análise de determinação de carga, através da adaptação do trilho como uma célula de carga e isso viabiliza a verificação das cargas em qualquer ponto da via, porém esses sistemas não permitem a filtragem ou retirada do efeitos dinâmicos da estrutura instrumentada (trilho), tornando o sistema B-WIM mais interessante e aplicável pelo mesmo permitir a filtragem desses efeitos a partir da medição das deformações e conhecimento dos parâmetros modais da estrutura (ponte).

Este controle das características de tráfego é interessante, por permitir um conhecimento mais detalhado desta ação preponderante nas estruturas ferroviárias. Este melhor conhecimento do tráfego ferroviário revela-se de especial interesse para a avaliação de estruturas já existentes. Muitos dos componentes da via têm um período de vida bastante curto, comparados aos dos veículos ferroviários, sendo por isso importante o controle da segurança das estruturas frente às variações das características da ação bem como dos seus efeitos, aumentando até a vida útil dos componentes da ferrovia.

Como exemplo pode-se citar o trem de minério da VALE que operava na Estrada de Ferro Carajás e era formado por 3 locomotivas e 208 vagões. Atualmente, a composição do trem de minério na EFC foi alterada, passando a ser constituída por 4 locomotivas e 330 vagões, correspondendo a um aumento de 58% no número de vagões e no peso bruto total do trem. Com essa alteração, o trem de minério da EFC está entre os maiores trens do mundo em operação, possuindo mais de três quilômetros de extensão. Torna-se de grande importância o controle do tráfego para saber-se o real carregamento que trafega na ferrovia para auxiliar a manutenção da via e principalmente das pontes.

Entretanto, o método precisa ser bem definido e aplicado, pois os efeitos dinâmicos junto à precisão da determinação da linha de influência podem induzir a grandes erros.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é implementar e avaliar a técnica de pesagem em movimento B-WIM (Bridge Weigh-in-Motion) baseada no algoritmo de Moses (1979) para tornar possível a implantação de um sistema de monitoração em pontes ferroviárias de concreto armado que iram contribuir para a manutenção da via e para a segurança das obras de arte. São objetivos específicos deste trabalho:

a) Implementar os algoritmos que compõem a técnica para que possam ser utilizados em futuras pesquisas para monitoração das vias férreas e de obras de arte que compõem as ferrovias brasileiras;
b) Avaliar a influência da velocidade de passagem do trem na precisão do método;
c) Aplicar a técnica empregando-se dados reais obtidos na monitoração de um viaduto férreo de concreto armado que faz parte da Estrada de Ferro Carajás.

1.3 Apresentação do Texto

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre o método de caracterização do tráfego pelo sistema Bridge Weigh-in-Motion.

O capítulo 3 descreve o método desenvolvido para a determinação da linha de influência experimental, usado para calibração no B-WIM, além de apresentar um estudo comparativo por meio da técnica B-WIM utilizando o algoritmo de Moses (1979).

No capítulo 4 são apresentados os algoritmos desenvolvidos para a realização desta pesquisa. Estes algoritmos são utilizados para caracterização do tráfego ferroviário (número de eixos e velocidade de passagem) bem como para determinar a carga por eixo e

o peso bruto. O algoritmo para determinação das cargas foi validado a partir de um exemplo teórico, onde se simulou a passagem do trem sobre a ponte e as cargas por eixos foram determinadas com 100% de exatidão para um caso quase-estático em que se tinha um veículo teórico conhecido. Em seguida, é apresentado um exemplo numérico, em elementos finitos, de um viaduto em concreto armado para aplicações do método, onde é feita a determinação das cargas por eixo para diferentes velocidades de passagem do trem.

O capítulo 5 traz um teste realizado em um caso real a partir de monitorações realizadas na mesma estrutura descrita no capítulo 4, onde foi obtido o peso bruto de uma locomotiva e suas devidas características (número de eixos, espaçamento entre eixos e velocidade de passagem).

Finalmente no capítulo 6, encontram-se as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Determinação Experimental de Cargas Móveis (Algoritmo de Moses)

As técnicas ou sistemas de caracterização de tráfego foram inicialmente voltadas para o transporte rodoviário e posteriormente aplicadas em ferrovias. Os estudos sobre as cargas do tráfego são uma prática comum no que diz respeito ao tráfego rodoviário pelo mundo. Este fato deve-se à grande expansão do tráfego rodoviário de mercadorias na segunda parte do século XX. Segundo James (2003), verificou-se que o crescente aumento das cargas transportadas pelos veículos conduzia à deterioração dos pavimentos e pontes surgindo por este motivo, a necessidade de controlar essas cargas. Inicialmente o controle era exercido através de sistemas de pesagem estáticos. Apesar da sua elevada precisão, os baixos números de veículos pesados bem como os atrasos causados pelo processo aumentaram o interesse de desenvolverem-se métodos de pesagem dinâmica "Weigh-In-Motion" (WIM).

Dentro da necessidade de se estudar a carga de tráfego em rodovias, foram projetados vários sistemas de pesagem em movimento que fazem medições através de sensores fixados no pavimento. Estes sistemas determinam com elevada precisão as cargas dos veículos para estudos de análise de fadiga no pavimento.

O projeto de desenvolvimento e pesquisa COST323 de acordo com a UE (1998) foi responsável por uma grande difusão dos sistemas WIM, onde a partir deste projeto financiado pela União Europeia, WAVE (Weigh-in-Motion of Axles and Vehicles for Europe), houve a participação de vários países que coordenaram e auxiliaram programas de monitoração pela Europa entre os anos de 1993 e 1998. O objetivo do projeto previu:

a. Análise das necessidades de WIM na Europa;
b. Testes de sistemas WIM existentes e novos protótipos;
c. Trabalhos preliminares para o desenvolvimento de documentos normativos para o WIM;
d. Acordos para mecanismos e protocolos que permitam a constituição de uma base de dados WIM Europeia;
e. Organização de conferências internacionais sobre os temas expostos.

Um dos sistemas ou casos WIM, amplamente usado, é o "Bridge Weigh-In-Motion" (B-WIM), desenvolvido na década de 70 por Moses (1979). O B-WIM difere dos demais sistemas pelo fato de medir as deformações da ponte durante a passagem do veículo e não do pavimento como nos demais. A vantagem deste sistema é que este método permite a pesagem ao longo do comprimento da ponte enquanto os demais mediam uma faixa do

pavimento. Além disso, é possível filtrar o sinal para retirar os efeitos dinâmicos causados por falhas nas rodas e irregularidades na via. O método pode ser aplicado tanto para a caracterização do tráfego em rodovias, quanto em ferrovias.

A medição das cargas por eixo e do peso bruto dos veículos é de grande importância para o controle e manutenção de uma via férrea, pois são fundamentais para determinar se a estrutura está submetida aos esforços a qual ela foi dimensionada, caso exista uma variação entre esses carregamentos é possível verificar os pontos de manutenção das pontes e da própria via para adequá-las ao carregamento real. De forma geral, essa informação é relevante para pesquisas de alteração de carregamento dos trens.

De acordo com Pimentel (2008), as características das estruturas para as quais se prevê a aplicação de algoritmos "B-WIM" são de particular importância para a obtenção de bons resultados, principalmente no que se refere ao vão e as propriedades dinâmicas da estrutura. As pontes de pequeno vão, preferencialmente de vão único, são as mais usadas para aplicação do algoritmo, devido normalmente as frequências naturais elevadas, suficientemente afastadas das frequências de passagem do tráfego para uma vasta gama de velocidades, além disso pontes de grande vão ou contínuas ocasionaria na presença de vários eixos sobre o mesmo, o que impossibilitaria a determinação da carga por eixo, mas sim dos truques.

Quanto às propriedades dinâmicas dessas pontes, devem ser filtrados os efeitos dinâmicos devido à passagem do trem, para que sejam isoladas as frequências do veículo, oriundas da relação entre a velocidade (que deve ser constante) e o espaçamento entre eixos do veículo, o que torna principalmente essas estruturas aptas para aplicação do algoritmo e o afastamento entre a frequência natural da mesma e a frequência de passagem dos eixos, equação (2.1).

$$f = \frac{V}{d_{eixos}} \tag{2.1}$$

Onde:

f é a frequência de passagem dos eixos;

V é a velocidade de tráfego do veículo;

d_{eixos} é a distância entre os boogies (conjunto de eixos mais próximos).

Além de a estrutura estar apta, existem outros fatores que podem diminuir a exatidão do método, tais como: a dificuldade na determinação da linha de influência (LI) que represente a estrutura adequadamente e a variação de velocidade durante a passagem do veículo.

A linha de influência deve levar em conta a presença de elementos da via, que influenciam na obtenção da mesma, como os dormentes, lastro, trilhos, que influenciam no espraiamento da carga. Portanto, se faz necessário, para uma verificação numérica ou experimental, que seja encontrada uma LI mais apropriada.

O algoritmo tem duas variáveis de entrada: a série temporal de momento fletor de uma determinada seção transversal da ponte e a sua respectiva linha de influência. A série temporal de momento fletor é obtida a partir das deformações medidas pelos extensômetros fixados nas vigas principais da ponte e a LI que deve ser representativa da estrutura analisada, conforme exposto anteriormente, e referir-se a mesma seção onde foi obtida a série temporal de momento fletor.

2.1 Algoritmo B-WIM

A fundamentação do algoritmo de Moses (1979) baseia-se no conceito de linha de influência, em que uma carga móvel sobre uma estrutura origina esforços proporcionais ao produto do valor da linha de influência e da respectiva carga. Assumindo que a estrutura possui *i* vigas longitudinais, cada viga deve ser instrumentada com um extensômetros na direção longitudinal na seção do meio do vão. Para uma determinada posição estática de um veículo, pode-se afirmar que o momento fletor total do tabuleiro é igual à soma dos momentos fletores em cada uma das vigas. O momento fletor pode então ser expresso como função da deformação por intermédio da relação:

$$M_i = f(\varepsilon_i) \tag{2.2}$$

Em que:

$f(\varepsilon_i)$ é a função das deformações medidas na viga *i*.

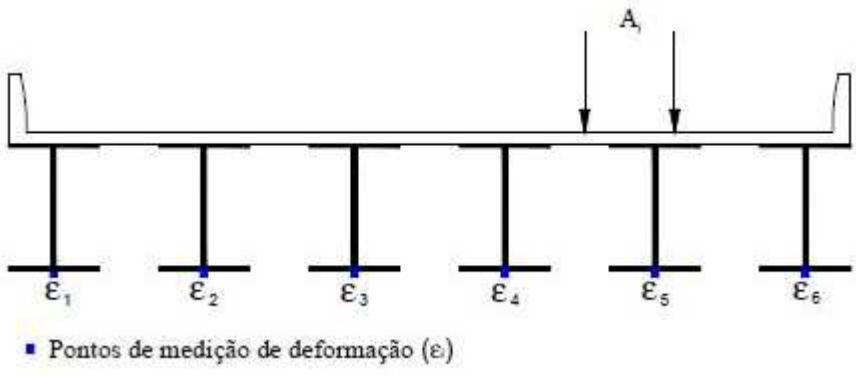


Figura 2.1 – Corte transversal do tabuleiro analisado e arranjo da instrumentação (Moses, 1979 *apud* Pimentel, 2008)

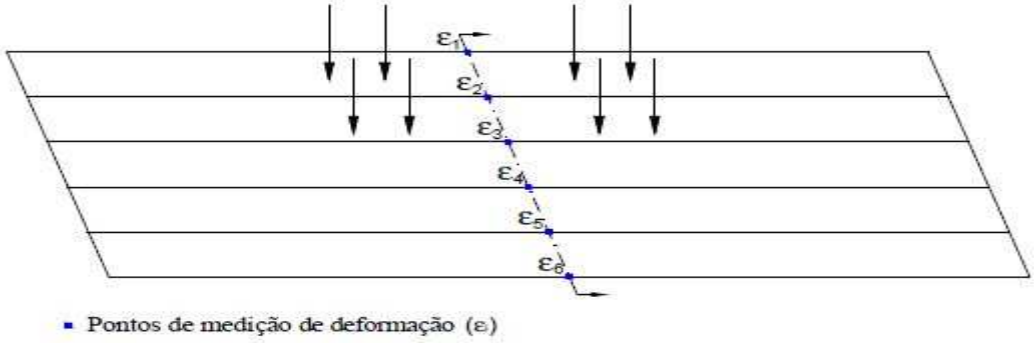


Figura 2.2 – Planta do tabuleiro analisado e esquema de veículo genérico (Moses, 1979 *apud* Pimentel, 2008)

O sistema Weigh-In-Motion (WIM) é um problema inverso, em que a resposta é conhecida, sendo necessário obter uma das variáveis que causam essa resposta. Conhecendo-se as características do veículo, o número de incógnitas do problema corresponde ao número de eixos (*N*) do mesmo podendo as suas cargas ser obtidas através dos *N* diferentes valores do momento fletor em *k* diferentes posições do veículo sobre a ponte, como apresentado na Figura 2.3.

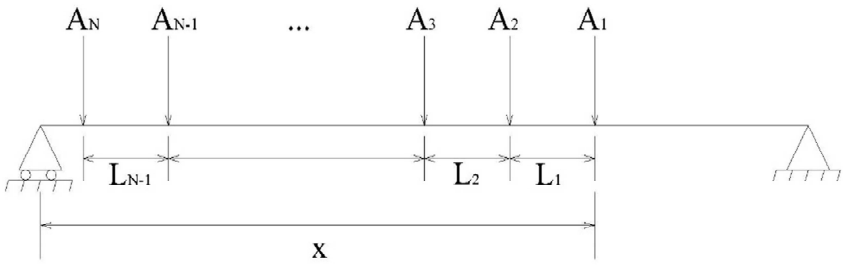


Figura 2.3 – Localização dos eixos ao longo da ponte

Considerando certa amostragem para a passagem de um veículo sobre uma estrutura, é possível definir o momento fletor como função do tempo ou do número de leituras. Da mesma forma, conhecendo a velocidade e o espaçamento entre eixos, é possível definir a

ordenada da linha de influência para cada eixo como função do tempo. Considerando o princípio de sobreposição de efeitos, o momento fletor teórico é dado por:

$$M_k(t_k) = \sum_{i=1}^{N} A_i I_i(t_k) \tag{2.3}$$

Sendo:

$M_k(t_k)$ é o momento fletor teórico no instante de tempo *k*.

A_i é a carga *i* atuante na estrutura no instante de tempo *k*.

$I_i(t_k)$ é a ordenada da linha de influência correspondente a posição da carga *i* na estrutura no instante de tempo *k*.

A Figura 2.4 apresenta a linha de influência de momento fletor no meio do vão para uma viga bi-apoiada onde é possível verificar a ordenada da linha de influência correspondente a posição da carga *A*.

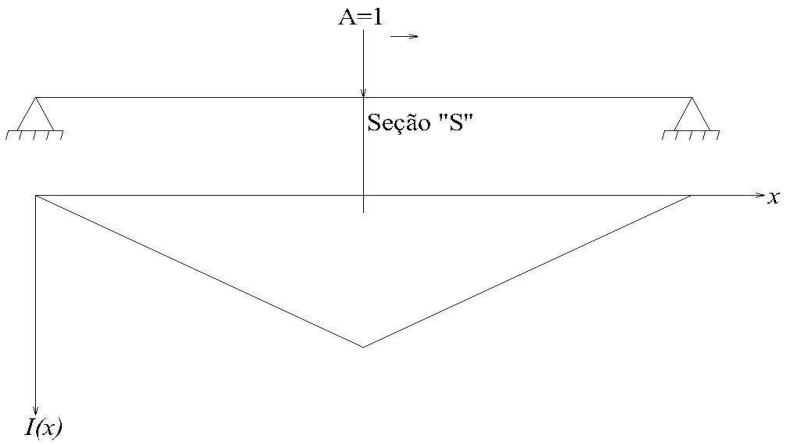


Figura 2.4 – Linha de influência de momento fletor no meio do vão para uma viga bi apoiada

Os resultados obtidos na monitoração da estrutura são obtidos em função do tempo. Identificando o valor de momento fletor no instante *k* como $\mathrm{M}_{\mathrm{k}}^{*}(t_k)$, é possível determinar a função desvio quadrática *E* entre o valor teórico e o valor medido do momento fletor através da equação (2.4).

$$E = \sum_{k=1}^{t_f} [M(t_k) - M^*(t_k)]^2 \tag{2.4}$$

Onde:

t_f é o número total de instantes de tempo da passagem do veículo, ou o tempo total do sinal;

$M^*(t_k)$ é o momento fletor obtido no instante de tempo *k*.

Como se deseja calcular as cargas faz-se a minimização da função erro em relação às cargas. Para isso, iguala-se as derivadas parciais de *E* em relação a cada uma das cargas A_j a zero, como mostra a equação (2.5).

$$\frac{\partial E}{\partial A_j} = 2\sum_{k=1}^{t_f}\left[\sum_{i=1}^{N} A_i I_i(t_k) - M^*(t_k)\right] I_j(t_k) = 0 \tag{2.5}$$

Simplificando a equação (2.5), tem-se:

$$\sum_{k=1}^{t_f}\left[\sum_{i=1}^{N} A_i I_i(t_k)\right] I_j(t_k) = \sum_{k=1}^{t_f} M^*(t_k) I_j(t_k) \tag{2.6}$$

Organizando para a forma matricial, toma-se a forma das equações (2.7) e (2.8)

$$[F] = \left[F_{ij}\right] = \sum_{k=1}^{t_f} I_i(t_k) I_j(t_k) \tag{2.7}$$

$$\{M\} = \left\{M_j\right\} = \sum_{k=1}^{t_f} M^*(t_k) I_j(t_k) \tag{2.8}$$

Onde:

$[F]$ é a matriz das linhas de influências de momentos fletores;

$\{M\}$ é calculado a partir dos momentos fletores medidos em função das deformações medidas e das linhas de influência;

Na forma matricial as cargas dos eixos, A, são encontrados pela solução da equação (2.9).

$$[F]\{A\} = \{M\} \tag{2.9}$$

A solução da equação (2.9) pode ser expressa na forma matricial como.

$$\{A\} = [F]^{-1}\{M\} \tag{2.10}$$

O peso bruto do veículo (PBT) é o somatório do vetor $\{A\}$.

$$PBT = \sum_{j=1}^{N} A_j \tag{2.11}$$

A matriz quadrada $[F]$ depende somente da linha de influência e dos espaçamentos entre eixos, por sua vez o vetor $\{M\}$ depende das medições de deformação, bem como da linha de influência. A linha de influência é encontrada a partir da passagem de uma carga unitária sobre a estrutura, Figura 2.4. Esta pode ser obtida também com uma calibração experimental, através da passagem de um veículo com as características conhecidas sobre a ponte.

2.2 Histórico de Pesquisas sobre o Sistema B-WIM

O sistema foi criado nos Estados Unidos por Moses (1979), porém foi amplamente usado na Austrália na década de 80 com a implementação do sistema "Culway", como pode ser visto na Figura 2.5, desenvolvido por Peters, segundo Tierney et al. (1996). No final da década de 90 já existiam mais de 100 sistemas B-WIM instalados nas estradas australianas com elevado sucesso. As principais preocupações em nível de desenvolvimento do sistema têm passado pela precisão, calibração e redução dos trabalhos de manutenção.

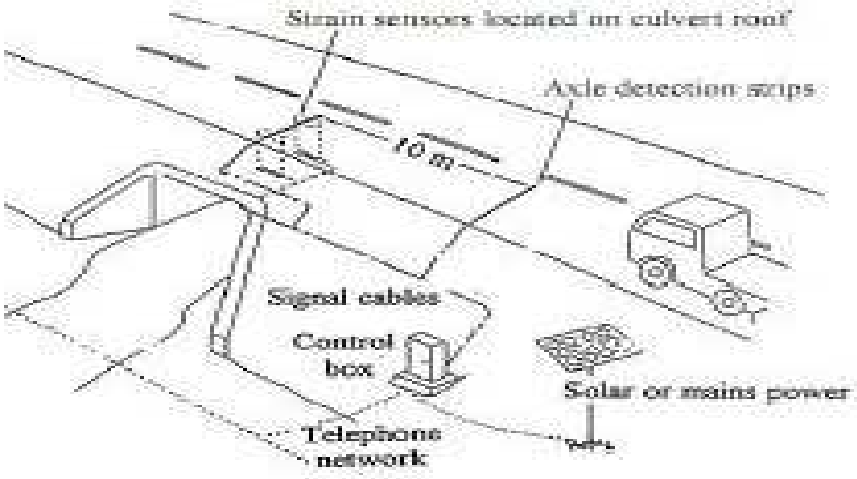


Figura 2.5 – Sistema B-WIM ("Culway") (Tierney et al., 1996)

A implementação do método B-WIM a pontes ferroviárias é bem recente tendo seus primeiros trabalhos publicados há 9 anos, a partir de pesquisas realizadas na Suécia.

Karoumi et al (2005) monitoraram uma ponte ferroviária de pórtico, próxima a estação de trem de Ärstaberg, com uso de uma instrumentação simples, que através da presença de picos no sinal, quando os eixos passam sobre a seção instrumentada, possibilita determinar a velocidade do tráfego entre outros pontos importantes para a caracterização do mesmo, citadas a seguir, e por fim permitiu firmar a aplicação do sistema em pontes ferroviárias, ver Figura 2.6.

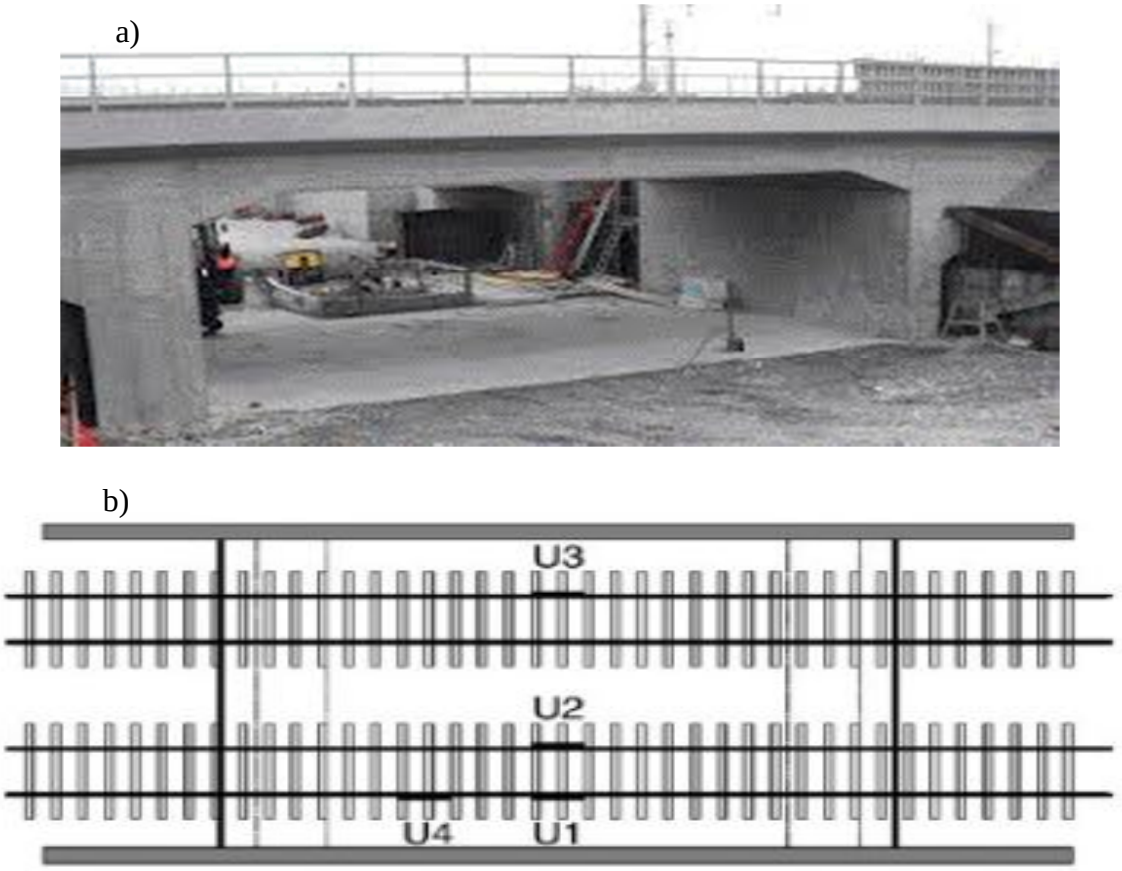


Figura 2.6 – a) Ponte de Ärstaberg; b) Esquema da instrumentação na via (Karoumi et al., 2005)

O método permitiu a determinação de pontos que definem o tráfego ferroviário:

a. Velocidade e aceleração do trem;
b. Aceleração da estrutura devida à passagem dos trens;
c. Posição dos eixos;
d. Número de eixos;
e. Carga estática por eixo.

A identificação do estado de conservação de estruturas com base em ensaios dinâmicos e caracterizações das ações experimentais foi o foco de estudo de Pimentel (2008) que

realizou testes numéricos para a validação do algoritmo e avaliou a influência da velocidade na determinação da linha de influência, que permitiu identificar as suas limitações, quanto aos efeitos dinâmicos quando podem ser separados das frequências da passagem do trem, e uma aplicação do algoritmo em uma ponte ferroviária de estrutura mista em Portugal, ver Figura 2.7 - a. Foram instalados sensores ópticos de deformação e deslocamento, Figura 2.7 – b, e visou-se obter:

a. As características dinâmicas da estrutura;
b. As características reais do tráfego ferroviário através do algoritmo B-WIM;
c. Os fatores de amplificação dinâmica em termos de deformações e deslocamentos;
d. Os níveis de aceleração máxima do tabuleiro.

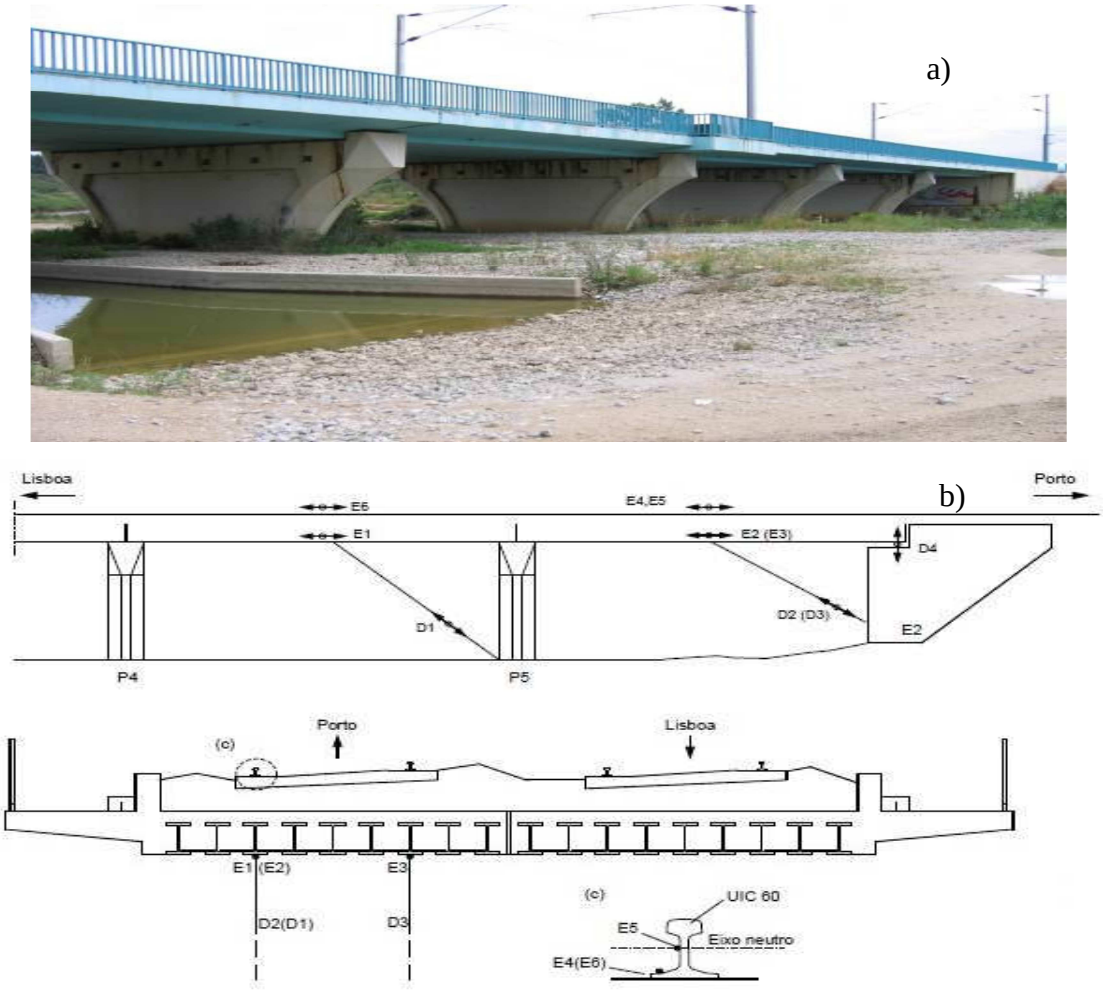


Figura 2.7 – a) Vista geral da ponte de Canelas; b) Esquema de instrumentação usado na monitoração (Pimentel, 2008)

2.3 Determinação Experimental da Linha de Influência

O teorema da reciprocidade de Betti define que em uma estrutura que possui comportamento elástico-linear, se for considerar dois sistemas de forças, que provocam

dois campos de deslocamentos, então o produto das forças do sistema com o deslocamento no ponto de aplicação da força obtido no sistema é igual ao produto das forças do sistema com o deslocamento no ponto de aplicação da força obtido no sistema, Ghali (2009), com isso a linha de influência pode ser interpretada da seguinte forma para cada abcissa x, o valor da ordenada da linha de influência é o valor que o esforço assume na abcissa fixa para a carga unitária situada em x.

Linhas de Influência (LI) descrevem a variação de um determinado efeito (por exemplo, uma reação de apoio, um esforço cortante ou um momento fletor em uma seção) em função da posição de uma carga vertical unitária que passeia sobre a estrutura. Assim, a LI de momento fletor em uma seção é a representação gráfica ou analítica do momento fletor, na seção de estudo, produzida por uma carga concentrada vertical unitária, geralmente de cima para baixo, que percorre a estrutura, Martha (2001). A Figura 2.8 mostra a LI de momento fletor em uma seção S indicada. Nesta figura, a posição da carga unitária P=1 é dada pelo parâmetro x, e uma ordenada genérica da LI representa o valor do momento fletor em S em função de x, isto é, $I(x)=M_s(x)$. Em geral, os valores positivos dos esforços nas linhas de influência são desenhados para baixo e os valores negativos para cima. Com base no traçados de LI's, é possível obter os esforços que são necessários para o dimensionamento de estruturas submetidas a cargas móveis ou acidentais.

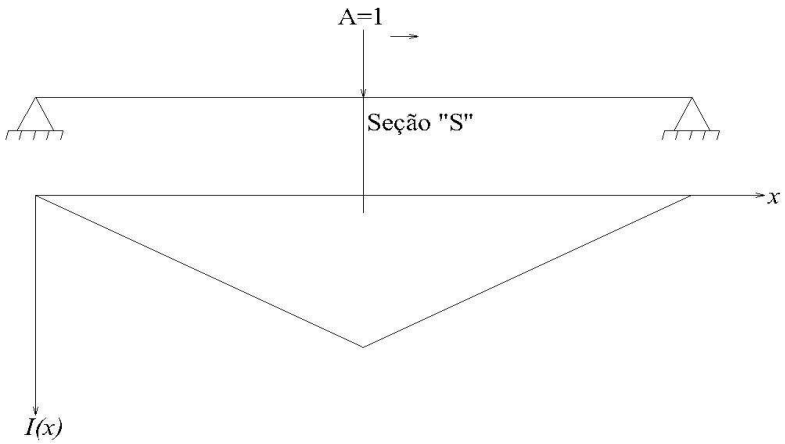


Figura 2.8 - Linha de influência de momento fletor em uma seção de uma viga contínua

A determinação adequada da linha influência é um dos pontos mais importantes para se ter um bom nível de precisão dos resultados B-WIM. As linhas de influência, que são utilizadas praticamente em todos os sistemas B-WIM, descrevem o comportamento estático da ponte sob uma carga unitária em movimento. A linha de influência real de muitas pontes situa-se entre as condições ideais de apoio simples e engaste.

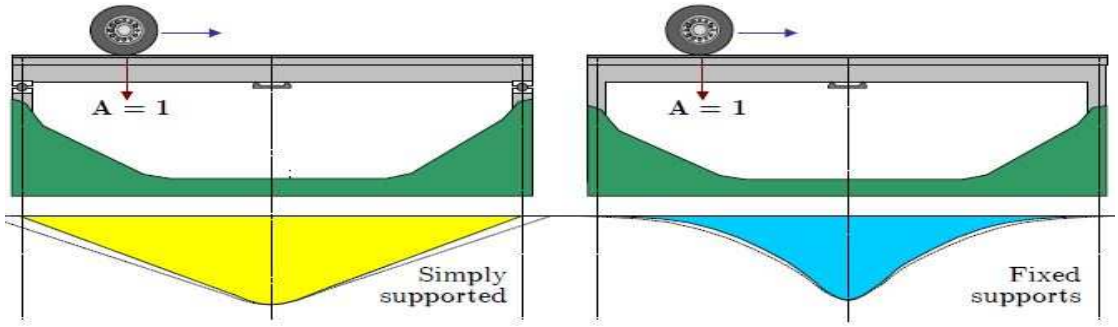


Figura 2.9 - Linhas de influência do momento fletor para estruturas bi apoiada e engastada (Znidaric e Baumgärtner, 1998)

Znidaric e Baumgärtner (1998) realizaram um estudo que investigou o efeito da escolha correta da linha de influência na precisão do sistema. Duas pontes de comprimentos diferentes, uma com 2 m de comprimento de vão e uma mais longa com 32 m. Para os sinais obtidos, foram escolhidas linhas de influência que estavam dentro dos dois casos limites, Figura 2.9. A previsão dos pesos por eixo mostrou-se imprecisa se uma linha de influência errada for escolhida, especialmente para a ponte de maior vão.

Na Figura 2.10 percebe-se que enquanto o erro é inferior a 10% em pontes mais curtas, o peso bruto total (GVW) e o peso do truque (Tandem), as cargas por eixo (Axle 1, Axle 2 e Axle 3) das pontes mais longas atingiram erro acima de 100%. Percebe-se que quanto maior for à diferença entre as deformações medida e teórica, maior o erro nos resultados das cargas por eixo. Já quanto ao peso bruto total os valores apresentaram-se razoáveis, levando a conclusão de que os pesos dos eixos podem ser redistribuídos substancialmente levando a erros por eixo muito grandes.

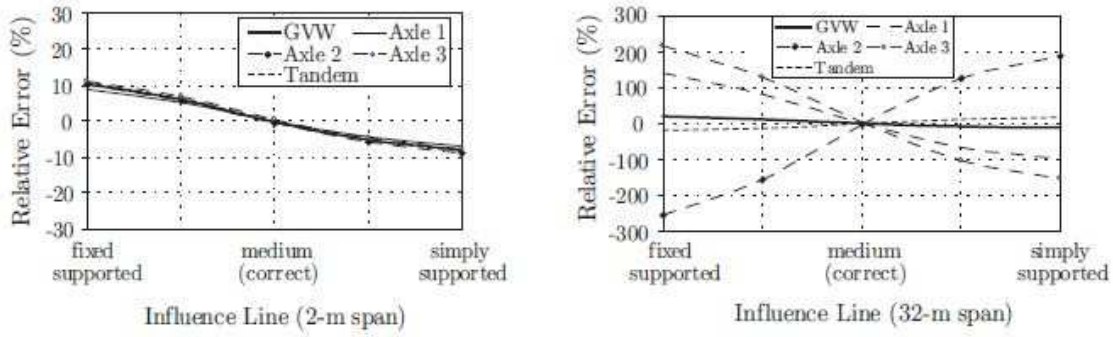


Figura 2.10 – Erros nos pesos para duas pontes devido a escolha errada da linha de influência. (Znidaric e Baumgärtner, 1998)

A linha de influência de uma ponte pode ser encontrada facilmente a partir do método dos elementos finitos com a criação de um modelo de barras. As condições de apoio junto com

o módulo de elasticidade do material podem ser admitidas, enquanto o módulo de flexão das seções varia de acordo com a altura da ponte. Embora isso permita uma razoável relação entre as respostas medidas e teóricas, vários fatores como a flexibilidade, a interação solo-estrutura da ponte, o envelhecimento dos materiais constituintes e as condições de apoio desconhecidos tornam uma linha de influência calculada teoricamente inadequada para os fins do algoritmo B-WIM, tornando mais aplicável a linha de influência numérica.

Estudos anteriores sobre determinação de linhas de influência testavam primeiramente a linha de influência teórica, com modificações depois aplicadas em uma curva para melhorar a precisão. Znidaric et al. (1998) propôs a revisão na linha de influência teórica, ajustando as condições de apoio e suavizando os picos interativamente levando em conta a presença de ruídos para conseguir uma melhor conformidade com a resposta medida.

Para obter melhores resultados, Moses (1979) minimizou o erro em relação às cargas, por essas serem o seu objetivo. O mesmo foi usado como base para determinar a linha de influência a partir da passagem de um veículo de calibração. Nesse caso, as cargas por eixo e a resposta da ponte são conhecidas, necessitando encontrar somente as linhas de influência para cada eixo. Para a solução dessa incógnita Quilligan (2003) desenvolveu um algoritmo para a geração de linha de influência automático e otimizado a partir de um veículo calibrado.

Na Figura 2.11 apresenta-se a resposta estática, referente ao momento fletor na seção do meio do vão para a passagem de três cargas móveis sobre uma viga simplesmente apoiada, com a linha de influência teórica.

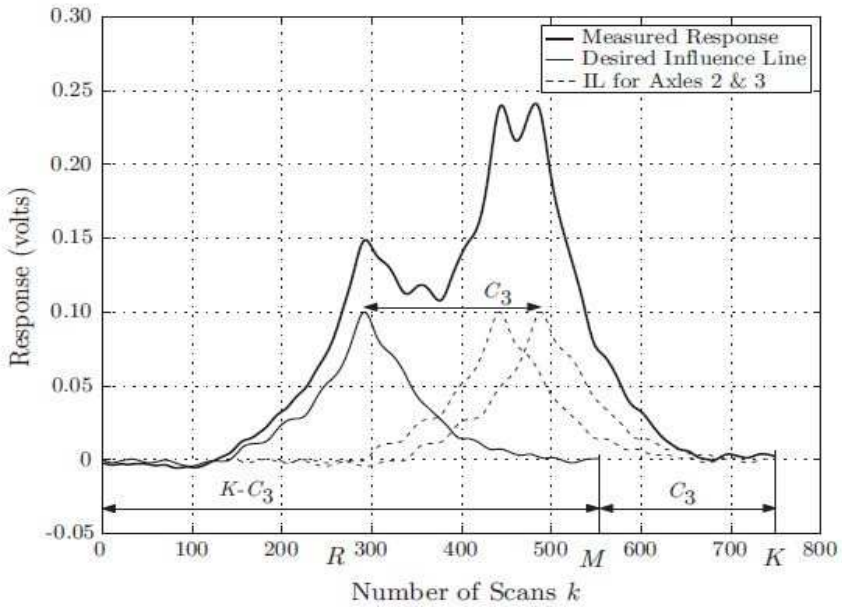


Figura 2.11 – Resposta medida a partir da passagem do veículo de calibração com 3 eixos, com a linha de influência requerida para ser calculada. O número de ordenadas de linha de influência é igual a $K - C_3$ (Znidaric e Baumgärtner, 1998)

O desenvolvimento das equações a seguir foi retirado de Quilligan (2003).

Para o veículo usado, o erro quadrático pode ser calculado como:

$$E = \sum_{k=1}^{K} \left[M^* - \left(A_1 I_k + A_2 I_{k-C_2} + A_3 I_{k-C_3} \right) \right]^2 \qquad (2.12)$$

Onde:

*M** série temporal de momento fletor;

A_j são as cargas por eixo, nesse caso 3 eixos;

I são as ordenadas da linha de influência em cada instante de tempo.

É necessário minimizar, o conjunto de ordenadas da linha de influência *I* em relação a *E*. A derivada parcial de *E* em relação a *R-ésima* ordenada da linha de influência, I_R, é escrita como:

$$\frac{\partial E}{\partial I_R} = 2\left[M_R^* - \left(A_1 I_R + A_2 I_{R-C_2} + A_3 I_{R-C_3}\right)\right](-A_1) + 2\left[M_{R+C_2}^* - \left(A_1 I_{R+C_2} + A_2 I_R + A_3 I_{R-(C_3-C_2)}\right)\right](-A_2) + 2\left[M_{R+C_3}^* - \left(A_1 I_{R+C_3} + A_2 I_{R+(C_3-C_2)} + A_3 I_R\right)\right](-A_3) \quad (2.13)$$

Onde $C_3 < R < (K - C_3)$, e pode ser organizada na seguinte forma:

$$A_1 A_3 I_{R-C_3} + A_1 A_2 I_{R-C_2} + A_2 A_3 I_{R-(C_3-C_2)} + \left({A_1}^2 + {A_2}^2 + {A_3}^2\right) I_R + A_2 A_3 I_{R+(C_3-C_2)} + A_1 A_2 I_{R+C_2} + A_1 A_3 I_{R+C_3} = A_1 M_R^* + A_2 M_{R+C_2}^* + A_3 M_{R+C_3}^* \quad (2.14)$$

Isso pode ser repetido para cada ordenada da linha de influência, produzindo um conjunto de equações lineares simultâneas $(K - C_3)$, igual ao número de incógnitas de ordenadas.

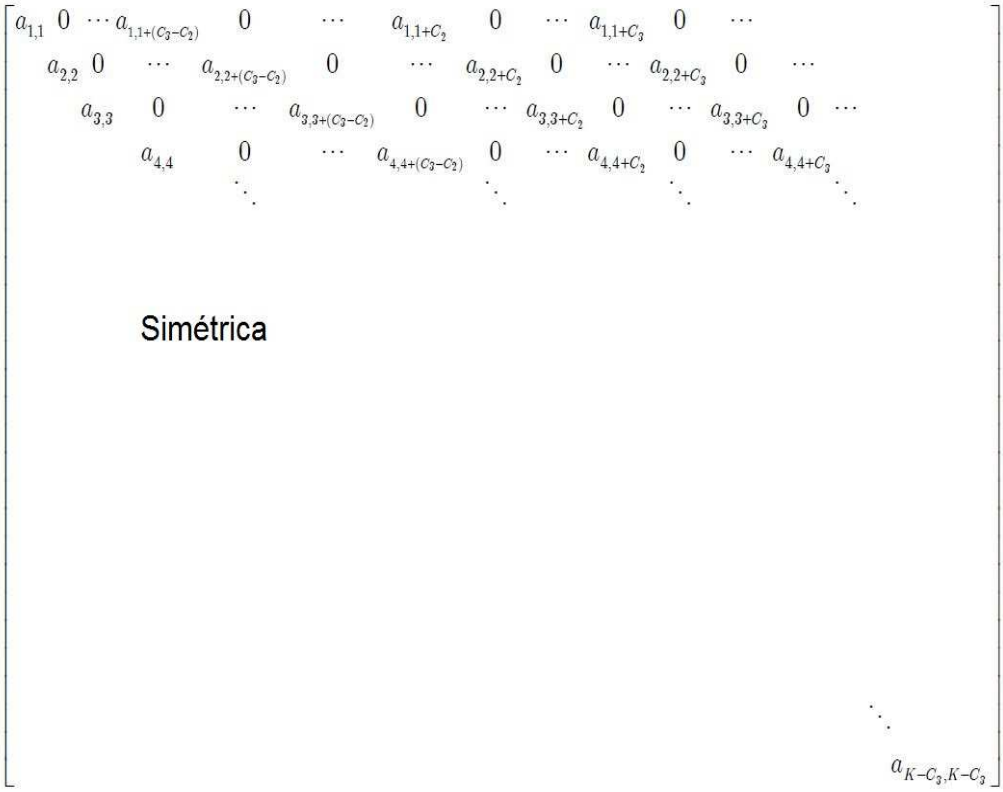
A equação (2.14) pode ser organizada para qualquer veículo e ficando na forma geral:

$$[A]_{K-C_N, K-C_N}\{I\}_{K-C_N,1} = \{M\}_{K-C_N,1} \quad (2.15)$$

Onde: $[A]$ é a matriz esparsa simétrica que depende dos pesos por eixo do veículo, $\{I\}$ é um vetor que contém as ordenadas da linha de influência desejadas, e $\{M\}$ é o vetor que depende dos pesos por eixo do veículo.

A diagonal principal de $[A]$ consiste da soma do quadrado dos pesos por eixo. O número de diagonais não principais é igual ao número de pares de eixos únicos, isto é, igual a $\sum_{i=1}^{N-1} i$. Essa propriedade é importante para observar, principalmente quando lidar com veículos que contenham um grande número de eixos. Estas diagonais estão afastadas da diagonal principal em distâncias proporcionais à distância entre o par de cargas representadas nessa diagonal e contém o produto de ambas as cargas, por exemplo, $A_1 A_2$, $A_1 A_3$ e $A_2 A_3$, sendo a distância entre as diagonais não principais e a principal dada respectivamente por $C_2 - C_1$, $C_3 - C_1$ e $C_3 - C_2$ para $(C_1 = 0)$, a equação (2.16) apresenta a matriz $[A]$ para o caso de um veículo com 3 eixos.

$$[A]_{K-C_3,K-C_3} =$$



(2.16)

Onde os elementos da diagonal principal para o primeiro elemento são:

$$a_{1,1} = \sum_{i=1}^{N} {A_i}^2 = {A_1}^2 + {A_2}^2 + {A_3}^2 \tag{2.17}$$

E os elementos das diagonais não principais são:

$$\begin{aligned} a_{1,1+(C_3-C_2)} &= A_2 A_3 \\ a_{1,1+C_2} &= A_1 A_2 \\ a_{1,1+C_3} &= A_1 A_3 \end{aligned} \tag{2.18}$$

O vetor $\{M\}$ é dependente das cargas do veículo:

$$\{M\}_{K-C_N,1}=\begin{pmatrix} A_1M_1^*+A_2M_{1+C_2}^*+\ldots+A_NM_{1+C_N}^* \\ A_1M_2^*+A_2M_{2+C_2}^*+\ldots+A_NM_{2+C_N}^* \\ A_1M_3^*+A_2M_{3+C_2}^*+\ldots+A_NM_{3+C_N}^* \\ \vdots \\ A_1M_{K-C_3}^*+A_2M_{K+C_2}^*+\ldots+A_NM_K^* \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

O vetor $\{I\}$ que contém as ordenadas da linha de influência desejadas, e pode ser encontrado através de:

$$\{I\} = [A]^{-1}\{M\} \quad (2.20)$$

No entanto, tendo em conta as dimensões elevadas da matriz $[A]$ e o fato desta ser uma matriz simétrica positiva, torna-se interessante o uso da decomposição de Cholesky. A decomposição de Cholesky exprime a matriz $[A]$ como o produto de uma matriz triangular $[R]$ pela sua transposta:

$$[A] = [R]^T[R] \quad (2.21)$$

A equação de $\{I\}$ fica:

$$[R]^T[R]\{I\} = \{M\} \quad (2.22)$$

Que pode ser resolvida no MATLAB com uso do operador "\", este operador permite resolver o sistema a partir de mínimos quadrados.

$$\{I\} = [R]\backslash([R]^T\backslash\{M\}) \quad (2.23)$$

Sendo o sistema resolvido diretamente da seguinte forma:

$$\{I\} = [A]\backslash\{M\} \quad (2.24)$$

A consideração destes métodos numéricos revela-se de particular importância tendo em conta as elevadas frequências de aquisição que conduzem a matrizes cujas dimensões podem atingir um grande número de linhas e colunas. Por esta razão, é importante evitar a inversão de matrizes que ocasionaria tempos de cálculo elevados.

3 Implementação e Validação por Intermédio de um Exemplo Numérico

A implementação das variáveis necessárias para a determinação da carga por eixo, peso bruto total e distância entre eixos foi feita dentro do ambiente do programa MATLAB®.

Com isso, é necessário validar todo o sistema, antes de aplicá-lo, pois o alto custo de uma viagem de campo inviabiliza a aplicação direta em uma estrutura e estaria diante de possíveis falhas de leitura e erros nos resultados, e também pela validação permitir verificar as limitações do sistema B-WIM. Neste âmbito, foi desenvolvido um exemplo numérico bidimensional, em elementos finitos, de um viaduto de concreto armado constituinte da Estrada de Ferro Carajás, gerenciado pela VALE, próximo à cidade de São Luís (MA) no software SAP2000®. A análise foi feita somente considerando meia seção transversal em virtude da simetria existente.

3.1 Descrição do Viaduto

O Viaduto sobre a CFN 1° travessia corresponde à obra de arte especial de número 01 (OAE 01) da Estrada de Ferro Carajás, estando situada no km 4+900. É um viaduto de concreto armado com extensão total de 44,90 metros, constituída por um vão isostático de 18,00 metros, um encontro esquerdo de 15,25 metros e um encontro direito de 11,65 metros. Nas figuras Figura 3.1-a e Figura 3.1-b apresenta-se uma fotografia de uma vista geral e um corte longitudinal desta obra, respectivamente.

A superestrutura da ponte constitui-se de duas vigas principais (longarinas), ligadas por vigas secundárias (transversinas) e tabuleiro, constituindo uma seção transversal em forma de "π", Figura 3.1-c. As longarinas e o tabuleiro formam um trecho contínuo que é separado por duas juntas de dilatação situadas sobre os encontros. As longarinas são vigas simplesmente apoiadas nos encontros do viaduto por meio de almofadas de neoprene fretado. O tabuleiro possui largura total de 4,80 metros.

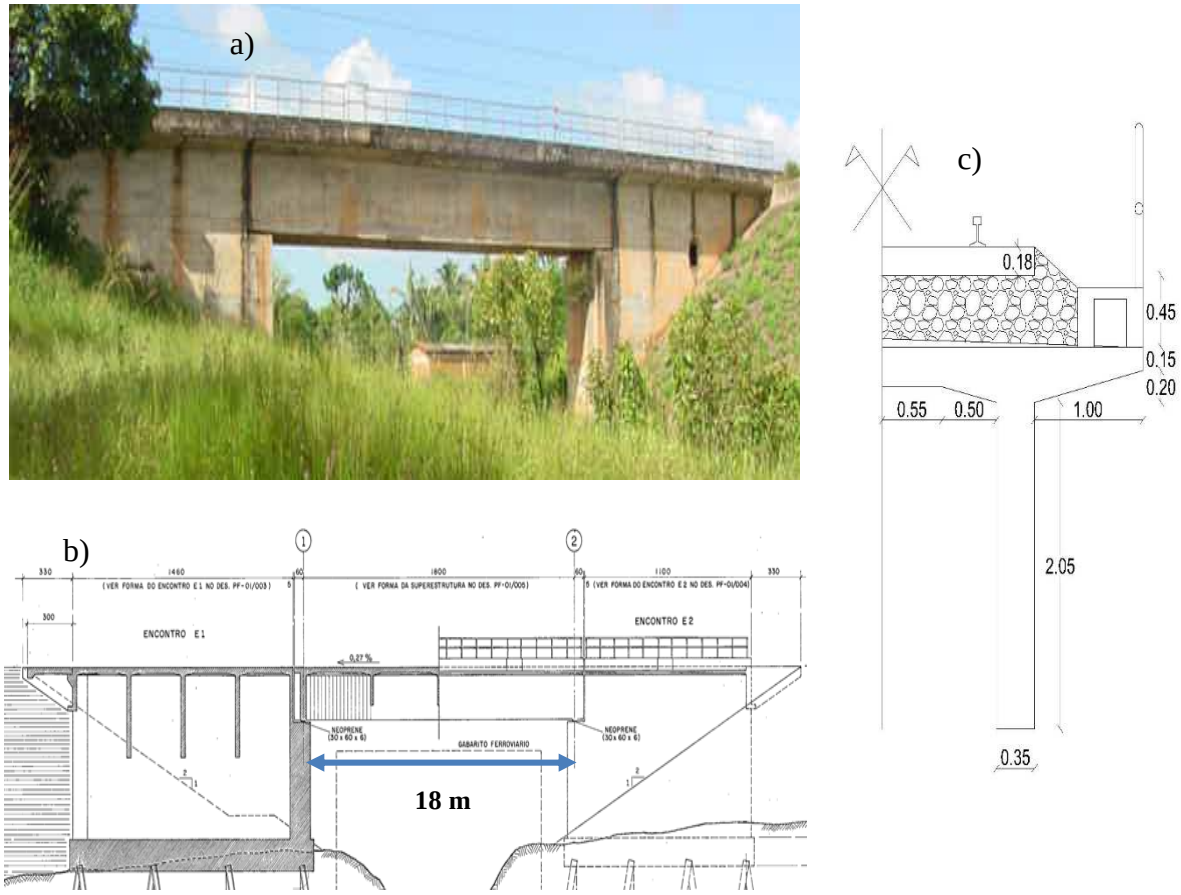


Figura 3.1 – a) Vista geral do Viaduto sobre a CFN 1ª travessia (VALE, 2003); b) Sistema estrutural da OAE 01 (VALE, 1978); c) Meia seção transversal do viaduto

3.2 Validação Teórica do Algoritmo de Moses (1979)

Para a validação do algoritmo foi implementada uma rotina para determinar a linha de influência. Usou-se como referência o viaduto descrito no tópico anterior para análise, Figura 3.1-a. Para a determinação da linha de influência da seção no meio do vão da longarina simulou-se a passagem de um veículo com uma carga unitária sobre a estrutura com velocidade de 1 m/s, para considerar uma análise quase-estática.

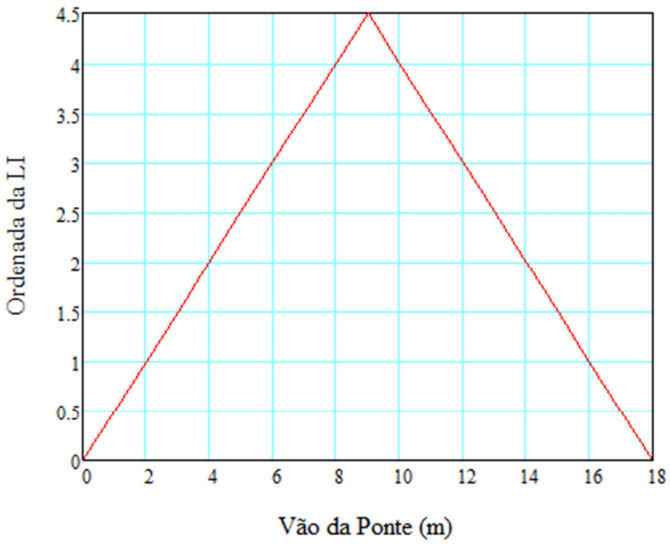


Figura 3.2 – Linha de Influência da Viga Principal

A linha de influência foi obtida com base na teoria descrita no início do tópico 2.3 para uma carga unitária aplicada no meio do vão de uma viga isostática. Após a geração da linha de influência da seção do meio do vão do viaduto apresentada na Figura 3.2 (as ordenadas da LI aparecem voltadas para a parte superior apenas pela representação de gráfico do MATHCAD® sendo o correto os valores positivos serem representados na parte inferior), programou-se um algoritmo que gera o trem tipo utilizado para passar sobre a estrutura. O veículo lançado é composto de 2 locomotivas e 4 vagões, o espaçamento entre eixos adotados será apresentado na Figura 3.7, onde por vez as cargas por eixo das locomotivas foram de 300 kN e os vagões de 325 kN, como mostra a Figura 3.3.

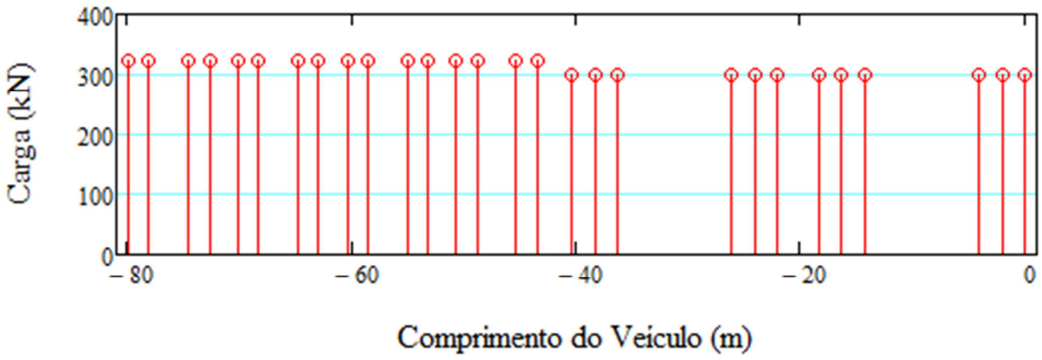


Figura 3.3 – Cargas por Eixo do trem-tipo utilizado na validação teórica do algoritmo

Com o trem tipo e a linha de influência pode-se determinar a série temporal de momentos fletores, através de um algoritmo que multiplica os valores de carga por eixo do veículo,

pela linha de influência em seus respectivos pontos, durante a passagem do veículo na estrutura, Figura 3.4.

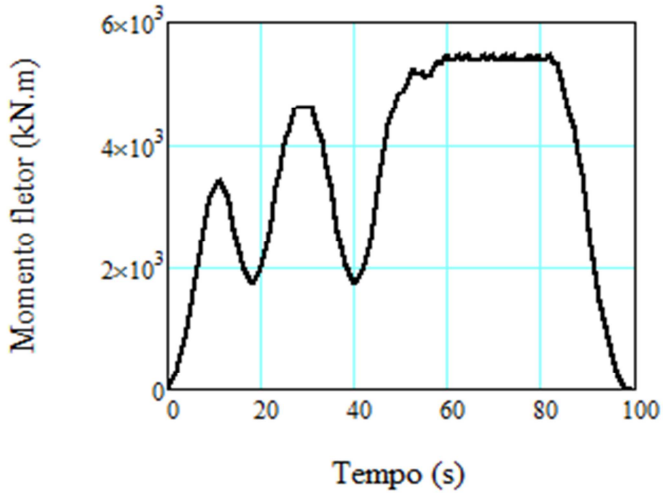


Figura 3.4 – Série temporal de momentos fletores no meio do vão.

A validação teórica do algoritmo B-WIM retornou os valores das cargas por eixo do trem, não havendo nem uma diferença em relação aos valores reais das cargas do trem e as previstas pelo algoritmo, conforme está apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Cargas por eixo do trem determinados pelo algoritmo na validação teórica

Eixo	Carga (kN)	Eixo	Carga (kN)	Eixo	Carga (kN)	Eixo	Carga (kN)
1º	300	8º	300	15º	325	22º	325
2º	300	9º	300	16º	325	23º	325
3º	300	10º	300	17º	325	24º	325
4º	300	11º	300	18º	325	25º	325
5º	300	12º	300	19º	325	26º	325
6º	300	13º	325	20º	325	27º	325
7º	300	14º	325	21º	325	28º	325

3.3 Descrição do Modelo Numérico

Na figura 3.5 apresenta-se o modelo numérico que representa a OAE 01 em meia seção, com 515 elementos e 483 nós com comprimento total de 18,25 m, devido a discretização dos dormentes e trilhos. A longarina e o trilho foram modelados com elementos de barra (frame), com as características definidas na Tabela 3.2. As placas de apoio foram modeladas como elementos de mola (spring) com constante $k = 100\ kN/mm$. Para os dormentes de madeira considerou-se a espécie *Eucalyptus Paniculata*, com as propriedades

definidas na Tabela 3.3, que foram modelados em elementos de placa (shell). O lastro foi modelado por elementos de casca e suas propriedades constam na Tabela 3.3.

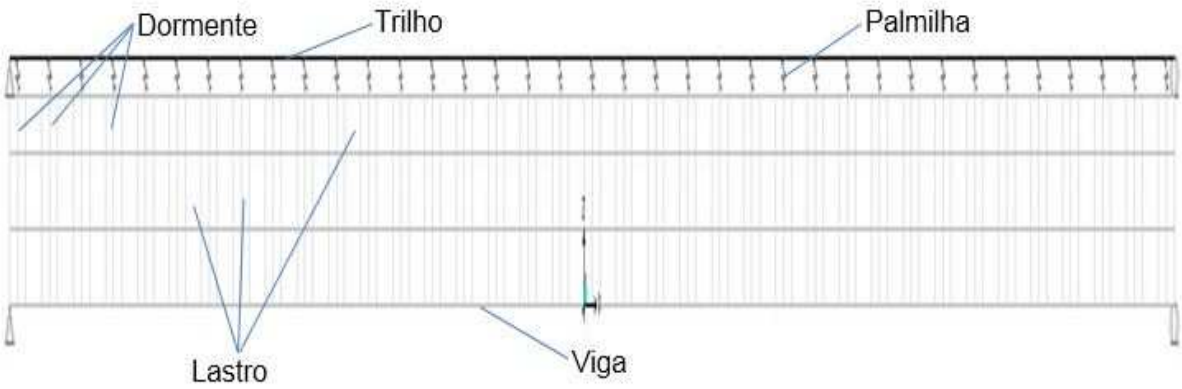


Figura 3.5 – Modelo numérico da OAE 01

Tabela 3.2 – Propriedades da viga e do trilho

Elemento	A (m^2)	I (m^4)	E (GPa)	$\boldsymbol{\nu}$	γ (kN/m^3)
Viga	1,39	0,7783	20,19	0,3	25
Trilho (TR 68)	$8{,}872 \times 10^{-3}$	$4{,}176 \times 10^{-5}$	205	0,3	76,9729

Tabela 3.3 – Propriedades dos dormentes e lastro

Elemento	Espessura (m)	E (GPa)	$\boldsymbol{\nu}$	γ (kN/m^3)
Dormentes	0,7	0,994	0,3	10,6598
Lastro	0,9	70	0,15	20,493

As características adotadas foram obtidas através de informações e relatórios fornecidos pela VALE.

3.4 Análise Modal

Para aplicação do sistema B-WIM é necessário fazer primeiramente uma análise modal da ponte, para determinar os parâmetros modais que auxiliam na modelagem e aplicação do método.

De posse dos valores das frequências naturais fundamentais da estrutura, pode-se assim definir se a mesma é aplicável ao B-WIM, pois a existência de grupos de eixos regularmente espaçados podem causar fenômenos de ressonância ou vibração excessiva na obra de arte especial, sendo o aumento da velocidade um fator básico para aumento dessa frequência, dada por:

$$f = \frac{\mathrm{v}}{d} \tag{3.1}$$

Em que:

v é a velocidade do veículo;

d é a distância média entre os eixos.

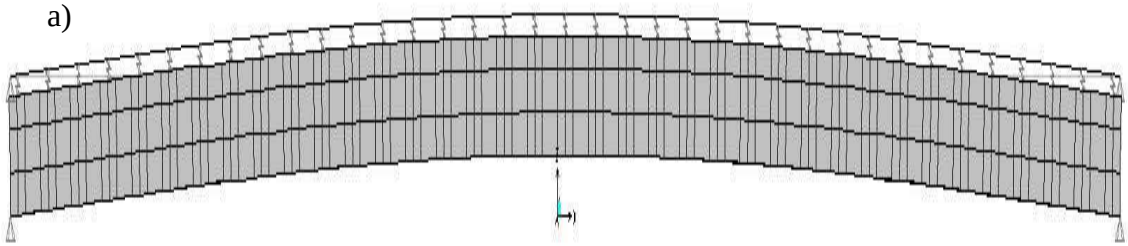
Essa frequência também permite dizer se pode ser aplicado o sistema B-WIM na ponte, pois a partir do instante em que a frequência natural da estrutura está próxima da frequência de passagem dos eixos torna-se muito complexo a separação dos efeitos.

As características modais da estrutura foram determinadas e as 5 primeiras frequências naturais obtidas referentes aos modos de flexão vertical e transversal, estão na Tabela 3.4. Análises preliminares foram realizadas a fim de detectar os modos de vibração mais relevantes obtidos no modelo, tendo-se como parâmetro a participação modal de massa, pois muitas formas modais corresponderam às palmilhas. A Figura 3.6 mostra os 2 primeiros modos de vibração obtidos.

Tabela 3.4 – Frequências naturais obtidas

Modo	Frequência (Hz)	Tipo
1	8,42	Flexão Vertical
2	30,21	Flexão Vertical
3	36,23	Flexão Transversal
4	61,88	Flexão Vertical
5	82,63	Flexão Transversal

a)



b)

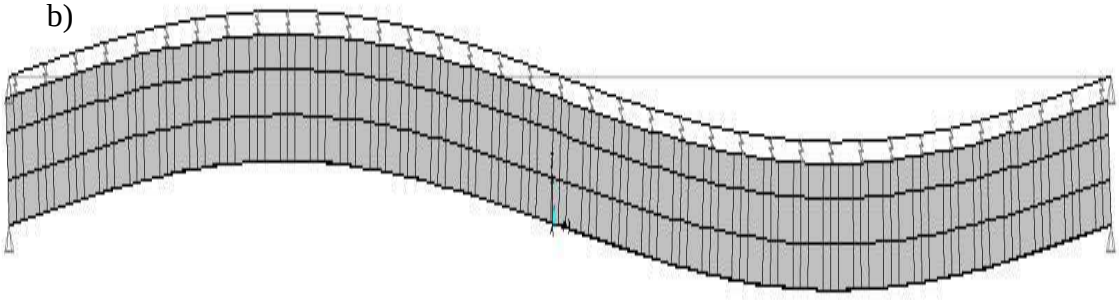


Figura 3.6 – a) 1º Modo de flexão vertical (f=8,42 Hz); b)2º Modo de vibração de flexão vertical (f=30,21Hz)

3.5 Algoritmo para Geração de Cargas Móveis

Para a validação do algoritmo B-WIM se fez necessário à elaboração de um exemplo numérico. Dentro do exemplo numérico torna-se indispensável a redução de tempo de processamento dos dados, pois o próprio SAP2000® oferece uma ferramenta de análise denominada Multi-Step, que simula a passagem do trem-tipo considerando o efeito dinâmico, porém o tempo de análise do programa para o caso em questão era em média de 2 horas para cada exemplo avaliado. Com isso foi necessário implementar no MATLAB® um algoritmo que gera as cargas móveis para a realização de análises dinâmicas para a obtenção das forças nodais (funções “Time History”).

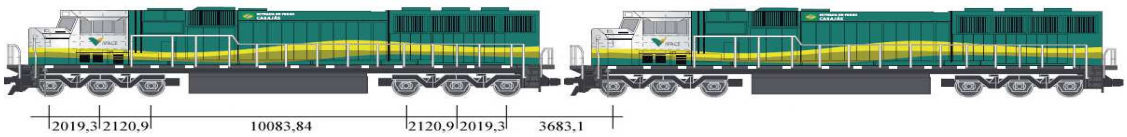
A criação desses arquivos é dada por um algoritmo desenvolvido neste trabalho, “Calcula_TimeHistory”, anexo B onde são especificados o arranjo do trem (coeficientes relativos aos pesos e distâncias entre eixos) e incremento de tempo, anexo A.

O “Calcula_TimeHistory” gera funções lineares que correspondem a passagem do veículo em cada ponto pré-determinado da ponte. Os dados de entrada são:

a) v é a velocidade do trem (m/s), que deve ser constante;
a) dt é o incremento de tempo (s);
b) L_{v} o comprimento do vão da ponte (m);
c) nv é o número de vãos;
d) nd o número de divisões do vão (discretização do modelo de elementos finitos).

O espaçamento dos eixos e as cargas por eixo adotadas no algoritmo foram fornecidos pela VALE. A Figura 3.7 mostra o espaçamento entre eixos das locomotivas (DASH-9) e dos vagões (GDT) adotados.

a)



b)

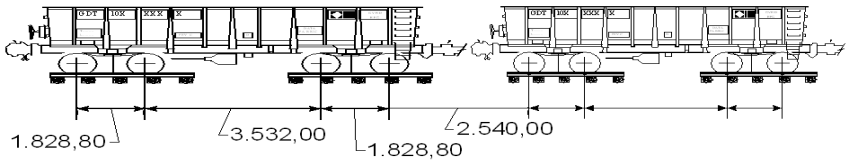


Figura 3.7 – a) Desenho esquemático da Locomotiva DASH-9; b) Desenho esquemático do Vagão GDT. Unidades em mm (VALE, 2009)

Da Figura 3.7, verifica-se que a locomotiva do tipo DASH-9 possui 6 eixos e os vagões GDT 4 eixos, as cargas adotadas para as mesmas foram:

Tabela 3.5 – Cargas das locomotivas e vagões (VALE, 2009)

Trem-tipo	Locomotiva DASH-9	Vagão GDT
Operacional Carregado	300 kN/eixo (1800 kN)	325 kN/eixo (1300 kN)

O algoritmo funciona carregando os nós com cargas unitárias e aplicando deslocamentos em função da velocidade e do incremento adotado. Dessa forma, obtêm-se as funções equivalentes à passagem dessas cargas em cada nó e o algoritmo atribui através de um vetor com coeficientes relativos aos eixos das locomotivas e vagões, que leva em conta a variação do peso do eixo da locomotiva e do vagão. Esse algoritmo permite auxiliar na determinação da linha de influência de forma numérica, se aplicado um vetor com coeficientes unitários.

$$P_{eixoLoc} = \frac{30}{30} = 1 \tag{3.2}$$

$$P_{eixoVag} = \frac{32{,}5}{30} = 1{,}0833 \tag{3.3}$$

Com os dados de entrada informados, o algoritmo determina o comprimento da divisão do vão (d) em metros, a partir de:

$$d = \frac{L}{nd} \tag{3.4}$$

Onde: *L* é o comprimento do vão; *nd* é o número de discretizações do vão.

Em seguida determina-se o número de eixos (ne) com base no comprimento do vetor das distâncias entre eixos. Por fim calcula-se o tempo total e as posições de cada eixo para a passagem do trem.

3.5.1 "Função Inicial"

A função inicial representa o primeiro nó a ser carregado na ponte durante a passagem de vários eixos.

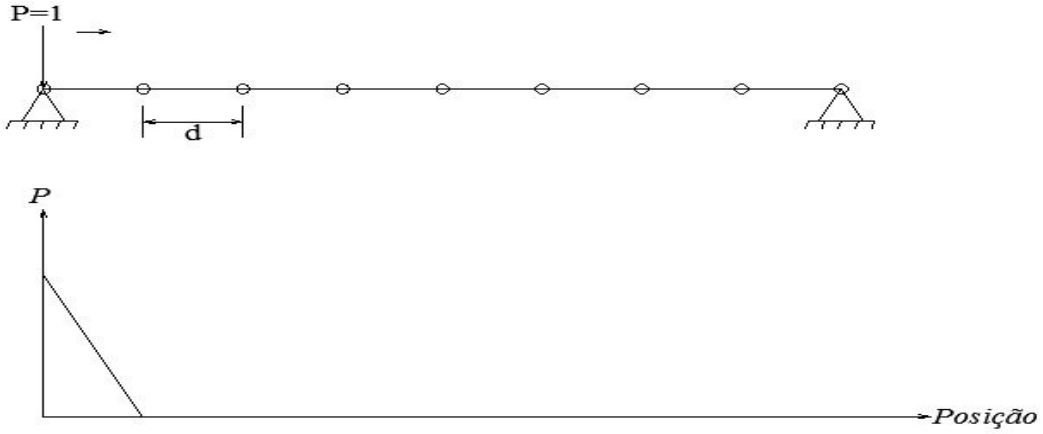


Figura 3.8 – Função inicial de um eixo no primeiro ponto "nó" de uma ponte de um vão bi apoiada

A função é definida dentro do intervalo $0 \leq Posição \leq d$ e anula-se para qualquer outro intervalo.

$$f_0(i,j) = \frac{\left(d - Posição(i,j)\right)}{d} \tag{3.5}$$

Onde:

$Posição(i,j)$ é a matriz posição para cada eixo *j* no instante de tempo *i*;

$f_0(i,j)$ é a matriz das funções iniciais para cada eixo *j* no instante de tempo *i*.

Então o algoritmo realiza um somatório das funções iniciais de todos os eixos multiplicando a matriz f_0 pelo vetor α que possui os coeficientes referentes aos pesos dos

eixos. Com o somatório obtêm-se o efeito de todos os eixos no nó inicial para cada instante de tempo.

$$\beta_0(i) = f_0(i,j).\alpha(j) \tag{3.6}$$

3.5.2 "Função Intermediária"

A função intermediária é a função que carrega todos os nós intermediários da ponte durante a passagem de vários eixos.

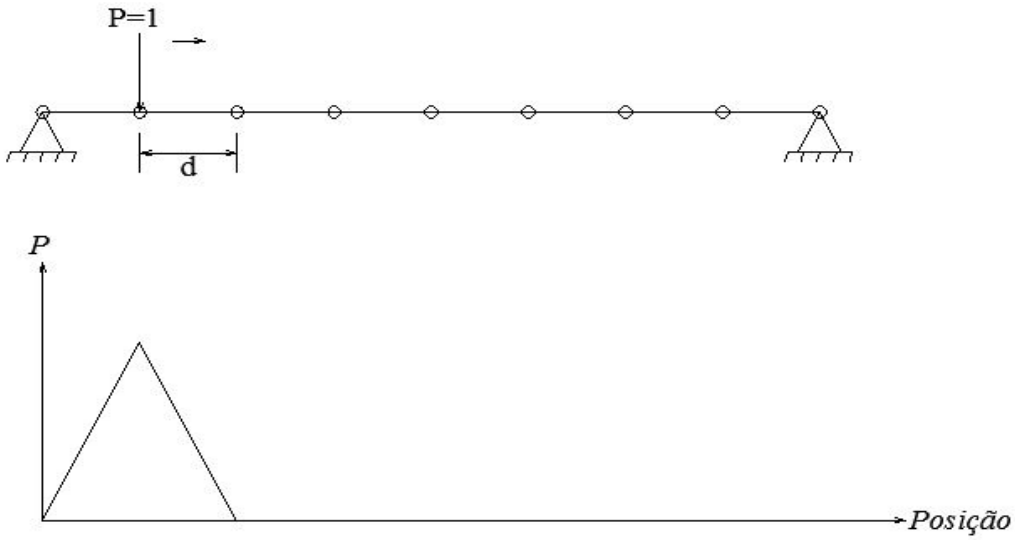


Figura 3.9 - Função intermediária de um eixo no segundo "nó" de uma ponte de um vão bi apoiada

Diferente da função inicial, a função intermediária é definida dentro de dois intervalos, $0 \leq Posição \leq 2d$ (intervalo definido para a Figura 3.9), e anula-se para qualquer outro intervalo. Esta também concebe uma função descontínua no meio do comprimento do intervalo, caracterizando assim duas funções correspondentes a cada lado do intervalo.

$$f_{int}(k,i,j) = \alpha(j)\left\{\frac{Posição(i,j) - [(k-1)d]}{d}\right\} \tag{3.7}$$

Para $(k-1).d \leq Posição(i,j) \leq k.d$

$$f_{int}(k,i,j) = \alpha(j)\left\{\frac{2 - \left[Posição(i,j) - \left((k-1)d\right)\right]}{d}\right\} \tag{3.8}$$

Para $k.d \leq Posição(i,j) \leq (k+1).d$

Em que:

$\alpha(j)$ é o vetor dos coeficientes referentes aos pesos por eixos do trem;

$f_{int}(k,i,j)$ é a matriz tridimensional das funções intermediárias, no nó *k* para cada eixo *j* no instante de tempo *i*.

Por fim, realiza-se o somatório da matriz f_{int} na dimensão *j*, que se refere aos eixos tendo como resultado a matriz $\beta_{int}(k,i)$, que representa o efeito de todos eixos para as k funções intermediárias, ou k nós em cada instante de tempo *i*.

3.5.3 "Função Final"

A função final representa o último nó a ser carregado na ponte durante a passagem de vários eixos.

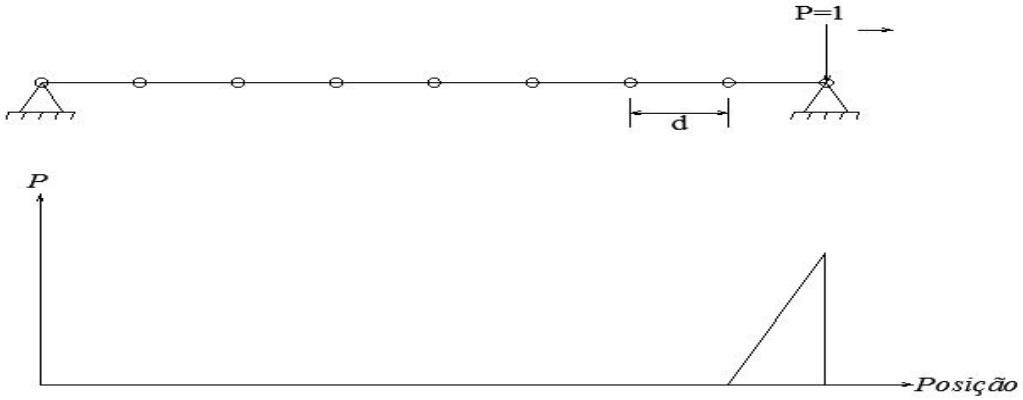


Figura 3.10 - Função final de um eixo no último "nó" de uma ponte de um vão bi apoiada

A função é definida dentro do intervalo *(k-1)d≤Posição≤*L_v e anula-se para qualquer outro intervalo. Onde *k* é o número de nós ($nd + 1$).

$$f_f(i,j) = \left[\frac{Posição(i,j) - (k-1)d}{d}\right] \tag{3.9}$$

Sendo:

$f_f(i,j)$ é a matriz das funções finais para cada eixo *j* no instante de tempo *i*.

O algoritmo realiza um somatório das funções finais de todos os eixos multiplicando a matriz f_f pelo vetor α que possui os coeficientes referentes aos pesos dos eixos, e obtêm-se o efeito de todos os eixos no nó final para cada instante de tempo.

$$\beta_f(i) = f_f(i,j).\alpha(j) \tag{3.10}$$

No último passo, o algoritmo organiza as funções obtidas em arquivos de textos equivalentes ao número de nós (*k*) considerados, e assim se alcançam as funções de cargas móveis a serem aplicadas em um software de elementos finitos.

A Figura 3.11 apresenta um fluxograma do algoritmo descrito.

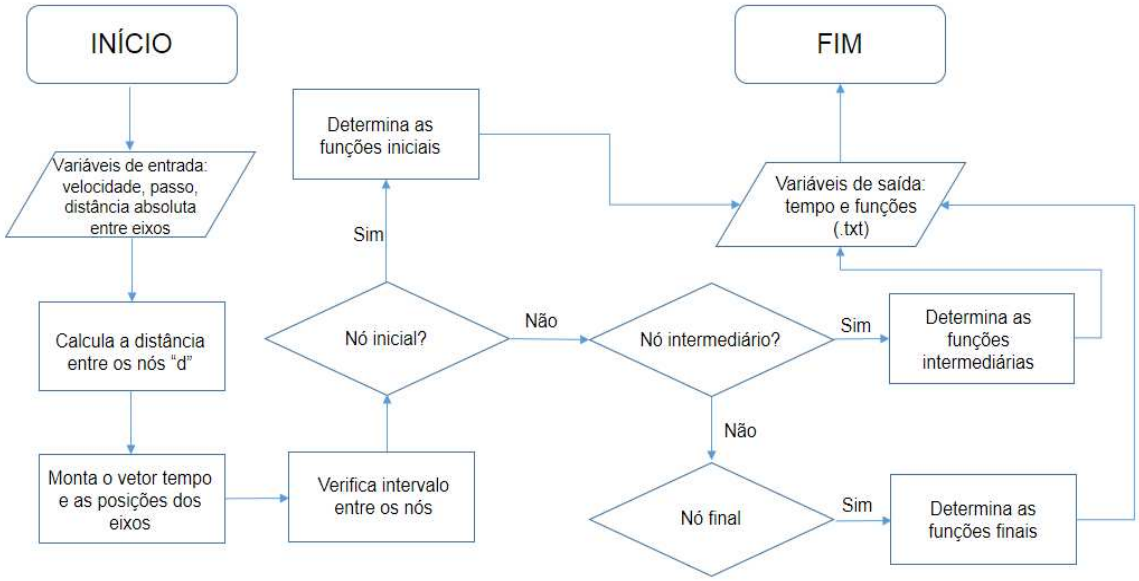


Figura 3.11 - Fluxograma relativo ao algoritmo "Calcula_TimeHistory"

3.6 Análise "Time History"

Nesta análise foram carregadas as funções geradas no algoritmo "Calcula_TimeHistory" e associadas a cargas, aplicadas em cada nó do elemento de barra referente ao trilho, correspondentes ao primeiro eixo da locomotiva DASH-9. Foi considerada uma análise "Time History" com o método da integração direta linear (Método de Newmark). O método é incondicionalmente estável para os coeficientes adotados (γ=1/2 e β=1/4) e com incremento de tempo de 0,01 s.

Os parâmetros para a matriz de amortecimento de Rayleigh foram obtidos fixando o valor do 1º e para o 4º modo resultando em a_0 =0,8057 (coeficiente proporcional de massa) e a_1 =1,89x10^{-3} (coeficiente proporcional de rigidez). A passagem do trem foi feita para 6 velocidades (1 m/s, 5, 10, 40, 60 e 80 km/h) para um arranjo de 2 locomotivas e 4 vagões, ver Figura 3.12.

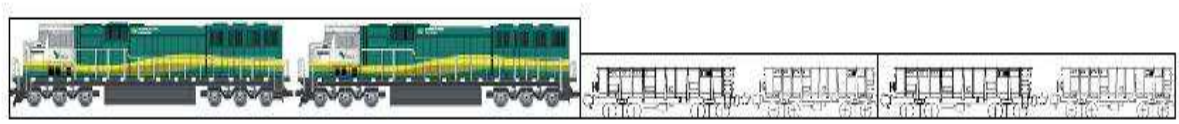


Figura 3.12 – Arranjo de 2 locomotivas e 4 vagões adotado

No caso de análise “Multi-Step”, o programa faz a análise dinâmica da ponte simulando numericamente a passagem do veículo. Já no caso “Time History”, o programa faz a análise dinâmica da ponte a partir das funções “Time History” geradas no algoritmo “Calcula_TimeHistory” desenvolvido neste trabalho. Após as análises, comparou-se o tempo total que o programa levou para obter os resultados nas duas análises realizadas. A Tabela 3.6 abaixo apresenta o tempo decorrido nas análises “Multi-Step” do SAP2000® e da análise do tipo “Time History” no SAP2000® que carrega as funções geradas no algoritmo. Verifica-se uma grande redução do tempo e de esforço computacional com a utilização das funções “Time History” que simulam a passagem do veículo.

Tabela 3.6 – Tempos de análises no SAP2000®.

Velocidades	Tempo de Análises		Redução do Tempo
	MS Dinâmico	TH Funções	
1 m/s	02 h 12 min	00 h 05 min	96,2%
5 km/h	00 h 56 min	00 h 03 min	94,6%
10 km/h	00 h 28 min	00 h 03 min	89,2%
40 km/h	01 h 47 min	00 h 05 min	95,3%
60 km/h	02 h 15 min	00 h 13 min	90,3%
80 km/h	01 h 44 min	00 h 05 min	95,1%

A Tabela 3.6 mostra que os tempos de análise foram bastante reduzidos, chegando-se no caso da simulação com passagem do trem a 1m/s, a uma redução de 96,2%. A Figura 3.13 apresenta esses valores em um gráfico de barra que permite visualizar a diferença que houve entre o tempo das análises. Essa grande diferença se deu principalmente pela análise “Time-History” desacoplar o sistema de equações.

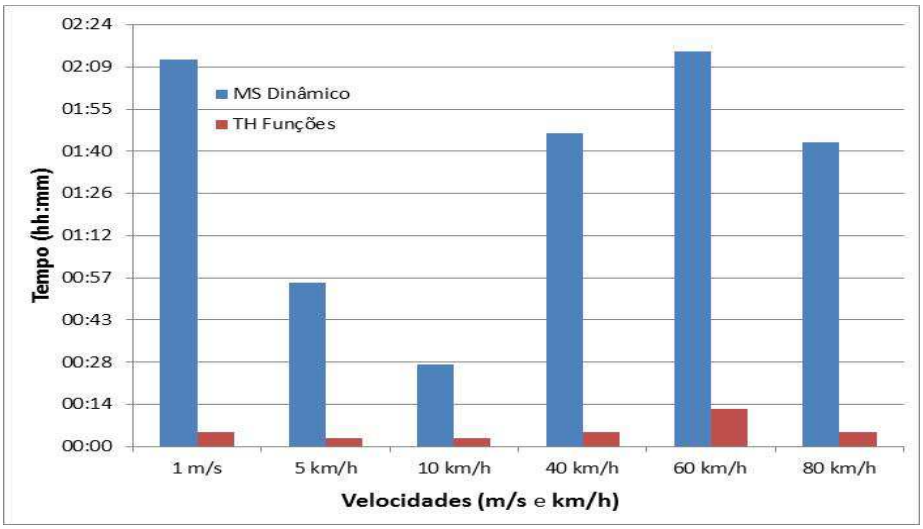


Figura 3.13- Comparação dos tempos das análises no SAP2000®.

3.7 Obtenção das séries Temporais de Momento Fletor

Para aplicação do algoritmo, considerou-se os momentos fletores na seção do meio do vão do viaduto retirados diretamente do modelo numérico. Quanto à filtragem do sinal, é importante que a frequência de corte do filtro não afete a sua parte estática dentro da resposta. Com esse intuito, as frequências relacionadas à distância entre eixos não devem estar entre as frequências naturais como pode ser observado nas tabelas 3.4 e 3.7, que apresentam os valores de frequência referente a passagem do trem para as velocidades consideradas na análise e as frequências naturais da estrutura, respectivamente.

Tabela 3.7 – Frequências relacionadas à distância entre eixos do trem para as velocidades de tráfego

	Frequências (Hz)					
Veículo	80 km/h	60 km/h	40 km/h	10 km/h	5 km/h	1 m/s
Locomotiva	1,56	1,17	0,78	0,19	0,10	0,07
Vagão	4,15	3,11	2,07	0,52	0,26	0,19

Com o fim de verificar os valores obtidos das análises do “Time History” com as do “Multi-Step” a Figura 3.14 apresenta as séries temporais de momento fletor obtidas nas duas análises, validando o algoritmo que gerou as funções para a análise “Time-History”.

a) b)

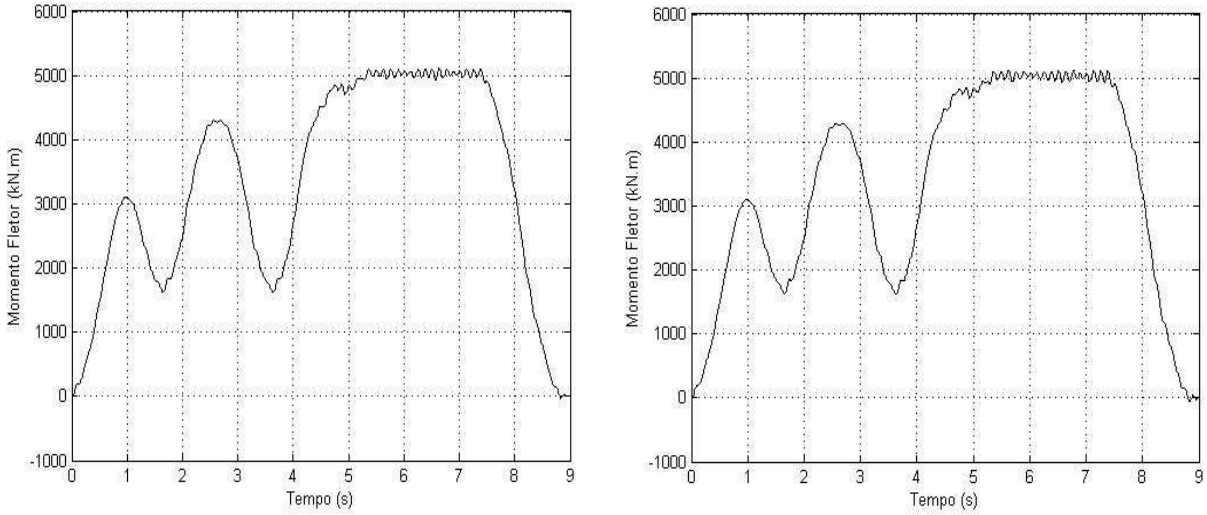
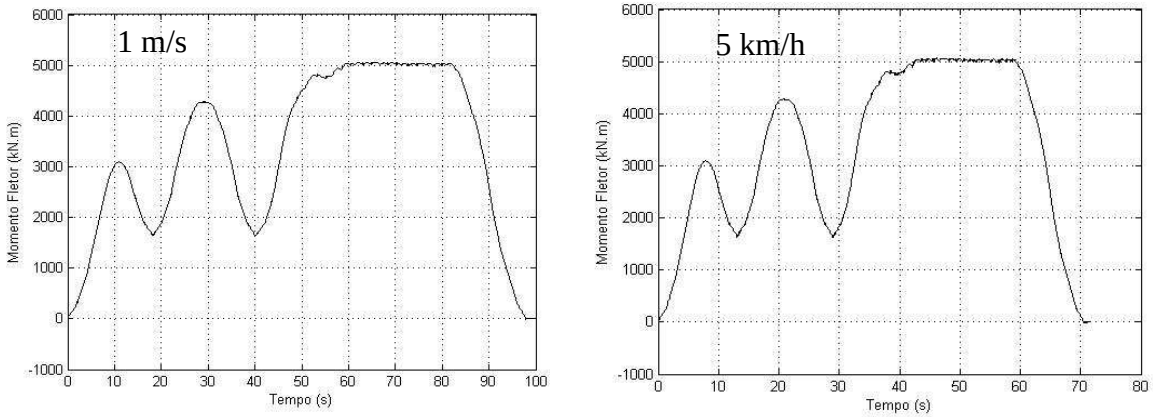


Figura 3.14 - Séries temporais de momentos fletores. a) Série obtida a partir da análise “Multi-Step”; b) Série obtida a partir da análise “Time History”.

Com isso aplicou-se a média móvel de ordem 7 e um filtro digital passa-baixa com frequência de corte de 8 Hz, um valor inferior a 1ª frequência natural (8,42 Hz) e superior a maior frequência de passagem do trem (4,15 Hz para passagem dos eixos do vagão a 80 km/h). Na Figura 3.15 apresentam-se as respostas filtradas para as passagens do trem a 1 m/s, 5, 10, 40, 60 e 80 km/h.



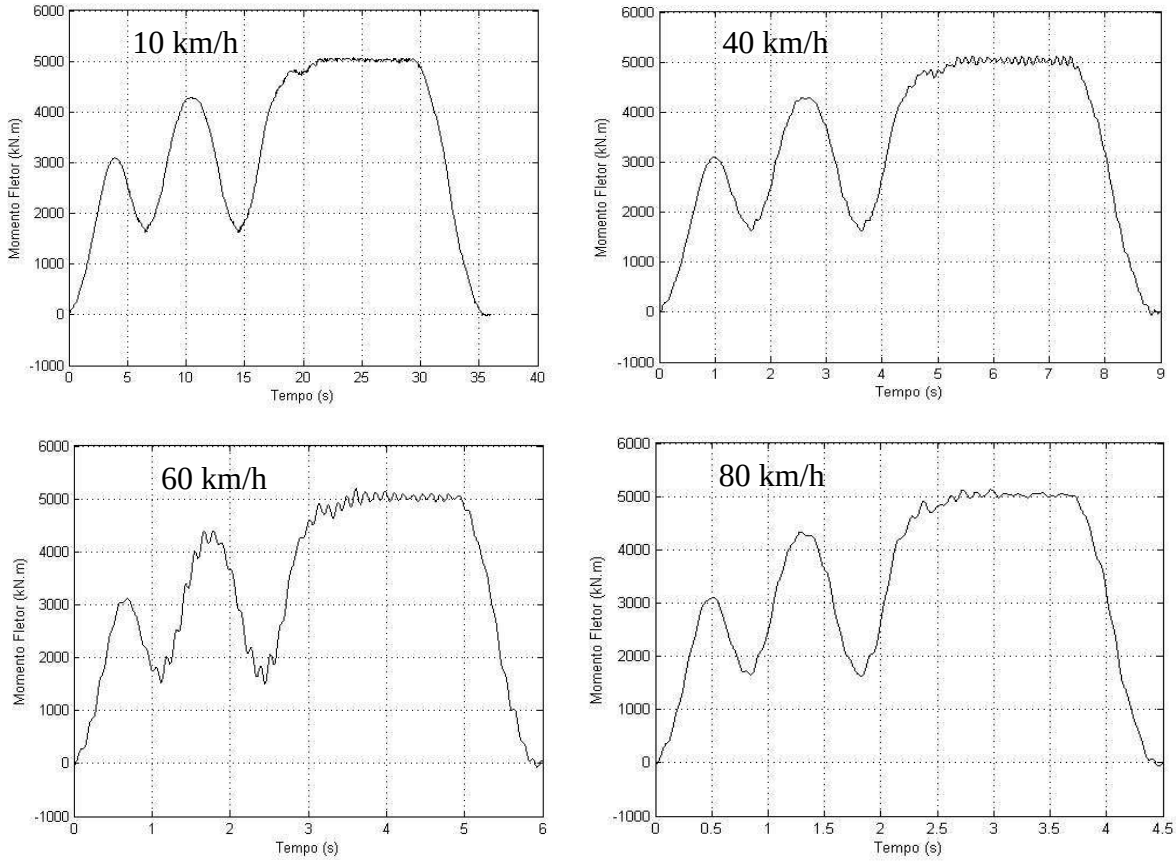


Figura 3.15 – Séries temporais filtradas do momento fletor na longarina para a passagem do trem

3.8 Geração da Linha de Influência

O algoritmo “GeraLI” gera a linha de influência de acordo com o descrito no tópico 2.3. Após isso, é feita uma suavização da linha de influência e esta é passada para o domínio do espaço para em seguida obter uma curva que a represente. As saídas desse algoritmo são os coeficientes oriundos da interpolação polinomial dos resultados obtidos, anexo F.

Para este caso numérico, a linha de influência de momento fletor, para a seção do meio do vão da OAE, foi calculada a partir do algoritmo descrito no item 3.5. Foram obtidas linhas de influência para todas as velocidades especificadas no item 3.6, e depois estas foram tratadas e seus coeficientes polinomiais determinados, ver Figura 3.16.

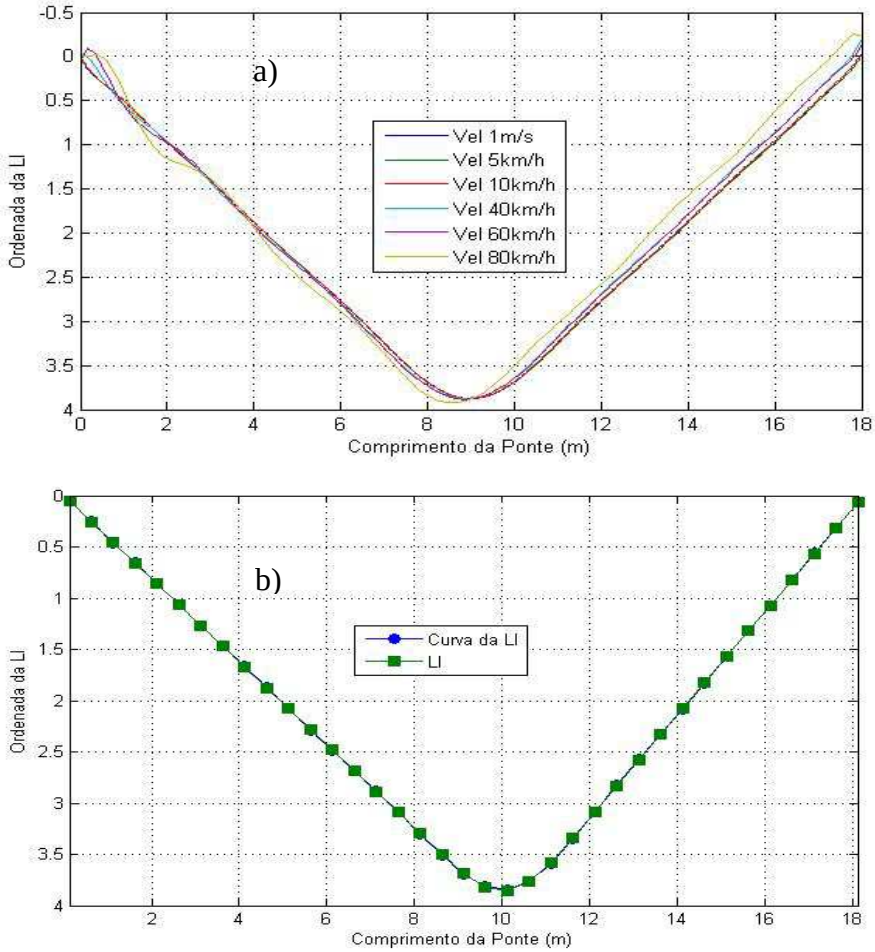


Figura 3.16 – a) Linhas de influências obtidas para várias velocidades para o viaduto modelado com 18,25 m de comprimento; b) Linha de influência obtida e curva da linha de influência gerada.

Da Figura 3.16-a verifica-se que para as velocidades inferiores a 80 km/h obteve-se ótimas estimativas para a linha de influência, entretanto, para a velocidade igual a 80 km/h houve uma certa discrepância entre os resultados obtidos, estes devidos aos efeitos dinâmicos que nem sempre são possíveis de se eliminar totalmente com a aplicação dos filtros digitais.

3.9 Determinação das Cargas

O algoritmo denominado de “DeterminaCarga”, anexo G, calcula a carga por eixo e o peso bruto total (PBT) do trem com base no que foi descrito no item 2.1. Para efeito de validação do exemplo numérico, calcula-se o erro relativo entre as cargas encontradas e as cargas de referência.

Como as distâncias entre os eixos já eram conhecidas a partir do algoritmo “DeterminaCarga” e da linha de influência, obtida para a passagem do veículo a 1m/s, foi possível determinar a carga por eixo e peso bruto total para as diferentes velocidades de tráfego do trem.

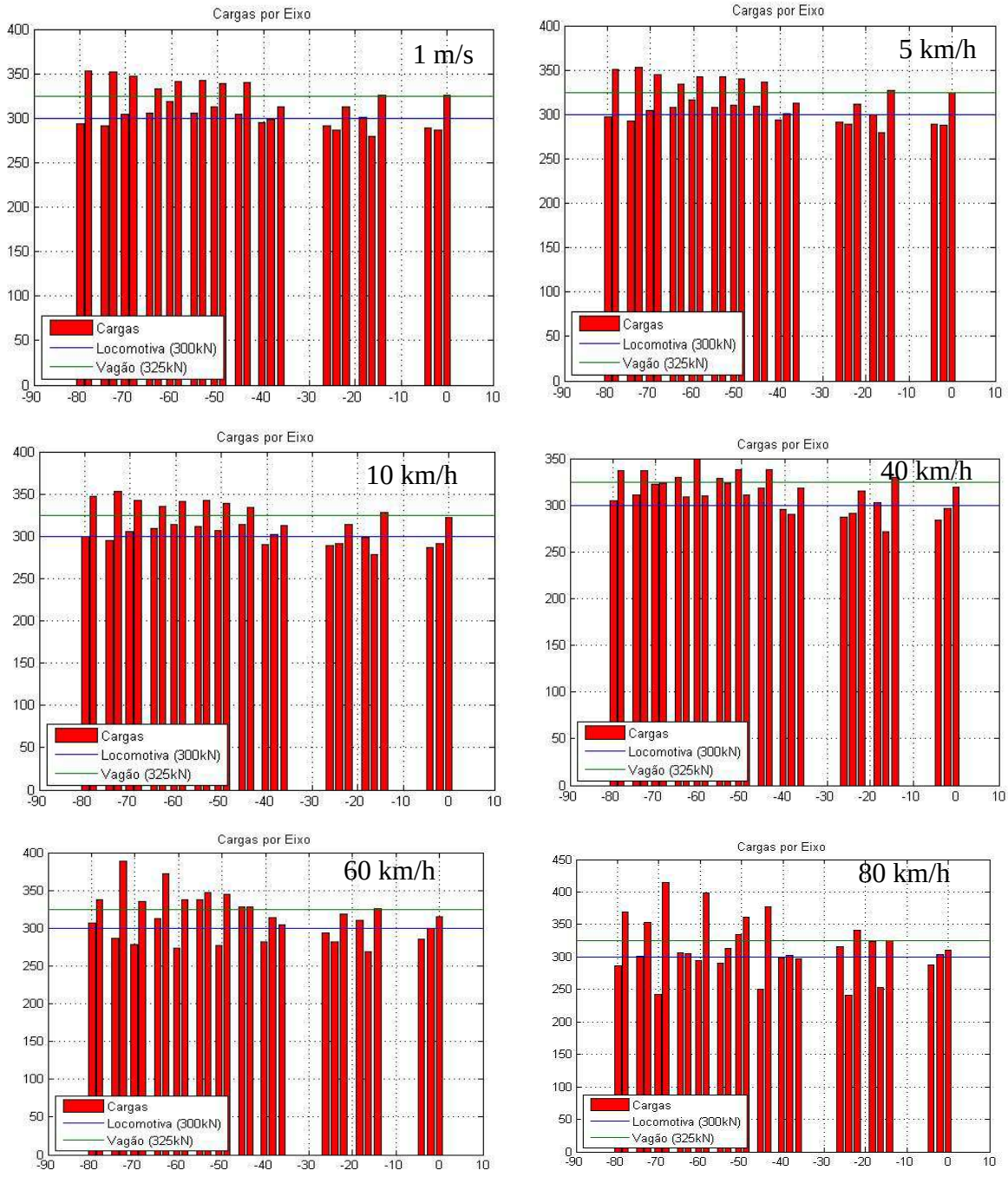


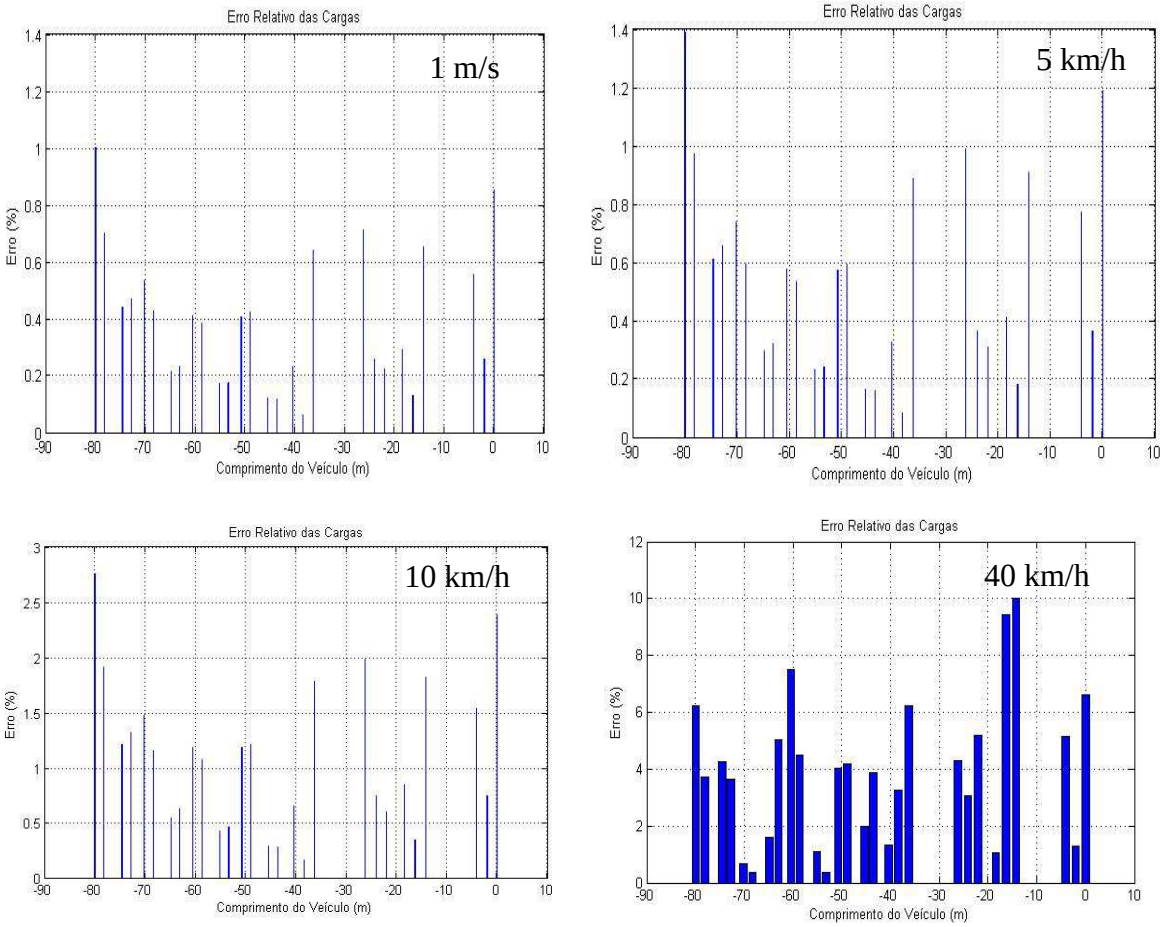
Figura 3.17 – Cargas por eixo obtidas para a passagem do trem

A Tabela 3.8 apresenta os valores de peso bruto total (PBT) encontrados e quando comparadas com o valor real (8800 kN), foram encontrados valores com aproximadamente 100% de exatidão para todas as velocidades de passagem, mesmo ocorrendo uma variação na carga por eixo. Quanto às cargas por eixo na Figura 3.17, estas tiveram uma pequena variação em torno dos valores reais, sendo que os resultados para a passagem do trem, nas velocidades de 60 km/h e 80 km/h, tiveram valores que variavam em torno dos valores reais.

Tabela 3.8 - PBT's obtidos para análise "Time History" e erros em relação ao PBT e médio por eixo

Velocidades	PBT (kN)	Erro em relação ao PBT (%)	Erro Médio por eixo (%)
1 m/s	8792,49	0,085	5,80
5 km/h	8795,70	0,048	5,55
10 km/h	8795,88	0,046	5,42
40 km/h	8796,83	0,035	4,67
60 km/h	8797,64	0,027	8,40
80 km/h	8797,80	0,025	12,81

Para uma melhor avaliação dos resultados encontrados foi calculado o erro relativo para cada eixo, Figura 3.18.



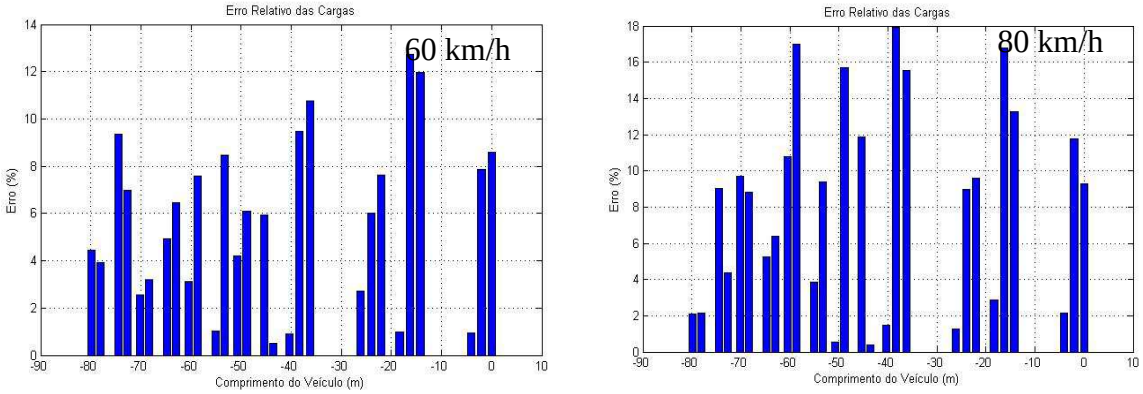


Figura 3.18 – Erros relativos de cargas por eixo obtidos para a passagem do trem

Na Figura 3.18 verifica-se que o erro relativo é menor para baixas velocidades devido à baixa atuação dos efeitos dinâmicos. Para as velocidades até 40 km/h o erro máximo foi de 10% referente ao 4º eixo da 1º locomotiva do arranjo (2 locomotivas e 4 vagões). Os erros relativos máximos encontrados para as passagens do trem as velocidades de 60 e 80 km/h foram de 12% e 18%, respectivamente. A partir das figuras dos erros relativos e das cargas por eixo obtidas conclui-se que os valores das cargas por eixo são distribuídos ao longo dos eixos, fazendo assim o erro relativo variar entre os mesmos e por fim o seu somatório é igual ao PBT do veículo, havendo na realidade uma distribuição do PBT ao longo dos eixos do veículo.

4 Caracterização e Pesagem de um Componente de um Veículo a partir de Dados Experimentais

Após a aferição dos algoritmos, buscou-se realizar uma pesagem e caracterização de um trem real, a partir de dados obtidos em uma campanha de um projeto de pesquisa.

A estrutura adotada foi a mesma utilizada para a aferição numérica, Figura 4.1, o que ocasionou uma grande dificuldade, pelo viaduto ser de concreto armado, tornando alguns fatores importantes na influência do resultado, como a variação do módulo de elasticidade em qualquer ponto da estrutura e a presença de fissuras que interferem na rigidez do viaduto. Como não há informações sobre o peso preciso dos vagões carregados (a análise foi feita para a 1ª locomotiva do arranjo), adotou-se a locomotiva do tipo DASH-9 mais usual na composição do trem de minério.

Figura 4.1 – Vista geral do Viaduto sobre a CFN 1ª travessia (VALE, 2003)

4.1 Determinação das propriedades mecânicas do concreto

As propriedades mecânicas do concreto foram determinadas a partir de ensaios destrutivos de resistência dos testemunhos retirados da estrutura de acordo com as prescrições normativas. Devido à presença de cabos da rede elétrica próximos ao viaduto, só foi possível retirar testemunhos da laje e dos encontros, impossibilitando a extração nas longarinas. Os resultados apresentados a seguir foram retirados do relatório técnico de avaliação da integridade estrutural da Obra de Arte Especial nº 01 feito pelo grupo de pesquisa NICAE (2009).

4.1.1 Preparação da amostra

Devido ao processo de extração, os testemunhos necessitaram de um processo de reparo. Pois alguns dos testemunhos apresentavam saliências em suas extremidades, alturas

superiores a 20 centímetros ou materiais alojados junto ao concreto, tais como pedaços de armadura e argamassa. Esses reparos foram realizados com o auxílio de uma serra circular, ver figuras 4.2 – a e b.

Figura 4.2 – a) Processo de marcação do testemunho para se alcançar a altura requerida de 20 centímetros. b) Corte das faces irregulares (NICAE, 2009)

4.1.2 Procedimento de ensaio

Os corpos-de-prova foram ensaiados a compressão seguindo-se as recomendações da ABNT na NBR8522/2008. Para isso, foi utilizada uma máquina de ensaio servo-controlada modelo PC-200CS, da marca EMIC. Os ensaios foram realizados com velocidade de carga constante, com a taxa de 0,25 MPa/s, seguindo-se o diagrama de carregamento mostrado na Figura 4.3.

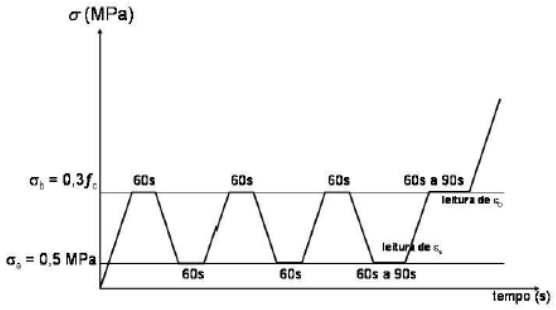


Figura 4.3– Diagrama de carregamento (ABNT NBR 8522/2008)

De acordo com a ABNT NBR8522 (2008), o valor do módulo de elasticidade do concreto é calculado na última rampa de carregamento, ver Figura 4.3, a partir da equação (4.1).

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \qquad (4.1)$$

Onde:

σ_b – é tensão correspondente a 30% da resistência estimada do material;

σ_a – é tensão correspondente 0,5 MPa;

ε_b – é a deformação correspondente a σ_b medida na última rampa de carregamento;

ε_a – é a deformação correspondente a σ_a medida na última rampa de carregamento.

As deformações foram medidas por dois extensômetros tipo “clip-gage” fixados na lateral do corpo-de-prova, um diametralmente oposto ao outro, conforme apode ser visto na Figura 4.4, e as cargas medidas automaticamente pelo sensor de pressão do óleo da prensa.

Figura 4.4– Extensômetros tipo “clip-gage” fixado no corpo-de-prova (NICAE, 2009)

4.1.3 Resultados obtidos

Das Figuras 4.5 a 4.7 estão apresentados os diagramas da tensão aplicada durante o ensaio em função do tempo, bem como os diagramas tensão-deformação nos ensaios dos corpos-de-prova.

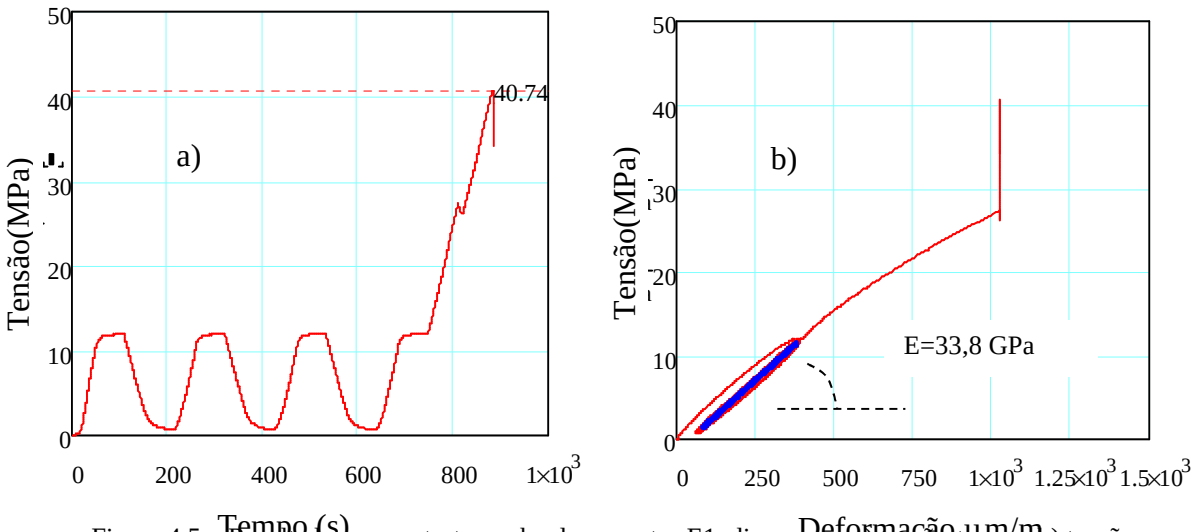


Figura 4.5 – Resultados para o testemunho do encontro E1, diagramas: a) tensão-tempo; b) tensão-deformação (NICAE, 2009)

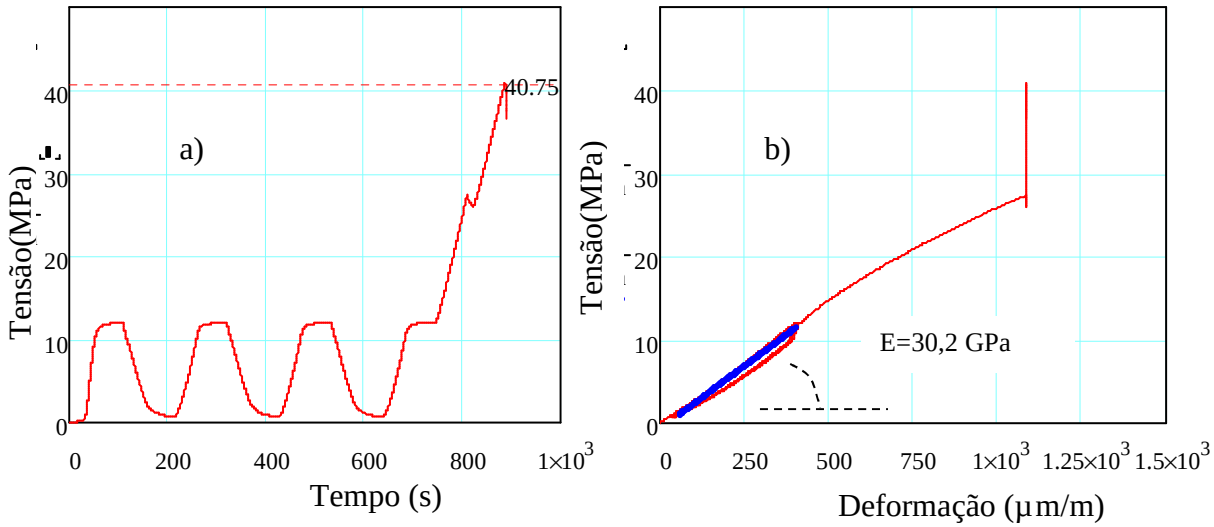


Figura 4.6 – Resultados obtidos para o testemunho retirado do encontro E2. a) Diagrama da tensão-tempo; b) Diagrama tensão-deformação (NICAE, 2009)

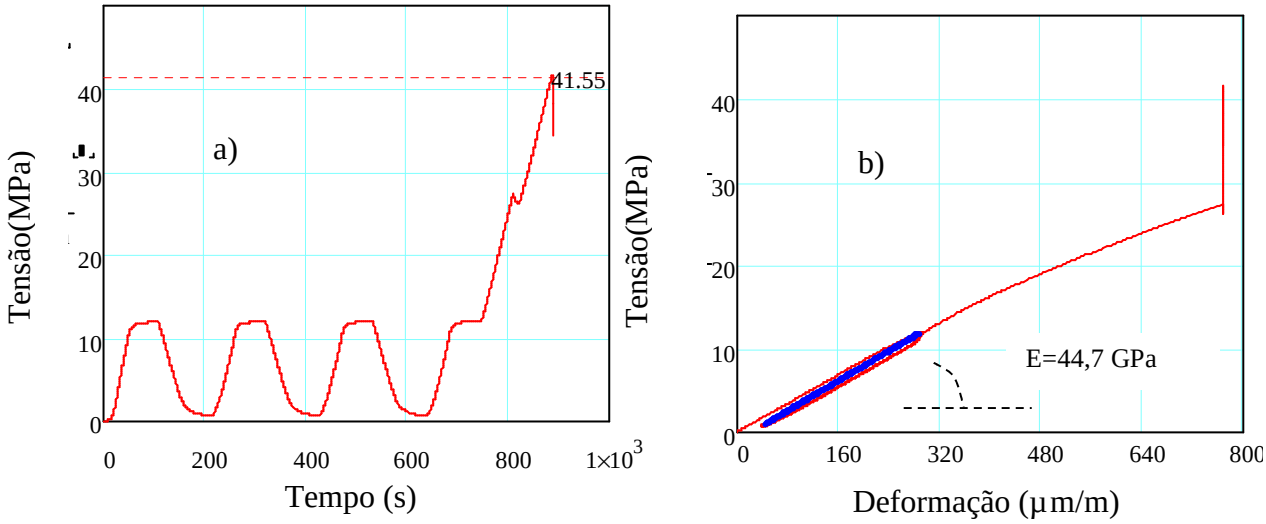


Figura 4.7 – Resultados obtidos para o testemunho retirado da laje. a) Diagrama da tensão-tempo; b) Diagrama tensão-deformação (NICAE, 2009)

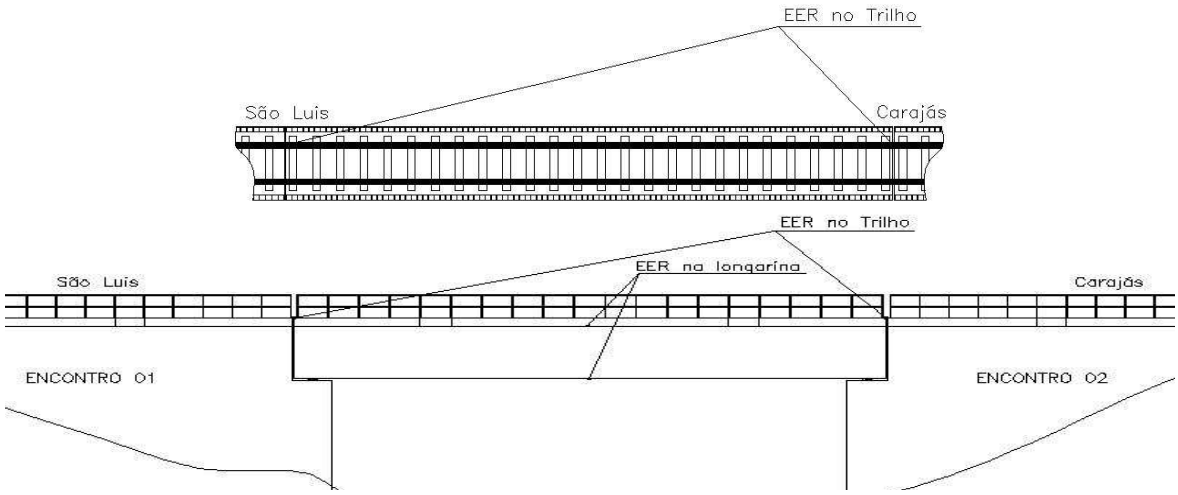
Na Tabela 4.1 estão apresentados os resultados obtidos para o módulo de elasticidade e para a resistência do concreto para cada testemunho, também apresentados das figuras 4.5 a 4.7.

Tabela 4.1– Resultados obtidos para o módulo de elasticidade e resistência do concreto (NICAE, 2009)

Testemunho	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência (MPa)
Encontro E1	33,8	40,7
Encontro E1	30,2	40,8
Laje	44,7	41,6
Valores médios	36,2	41,0

4.2 Instrumentação do Viaduto

A instrumentação do viaduto foi feita na seção transversal do meio do vão do viaduto e duas partes dos trilhos, nas seções das duas juntas de dilatação, ver Figura 4.8, na entrada e saída do viaduto. Devido à presença de uma viga transversina no meio do vão em uma seção a 1 metro do meio do vão foram instalados dois extensômetros elétricos de resistência (EER), da marca KYOWA do modelo KFG indicado para ensaios externos e resistente à umidade, na direção longitudinal, sendo um na armadura inferior da longarina e o outro em sua extremidade superior, fixado diretamente sobre o concreto, ver Figura 4.8.



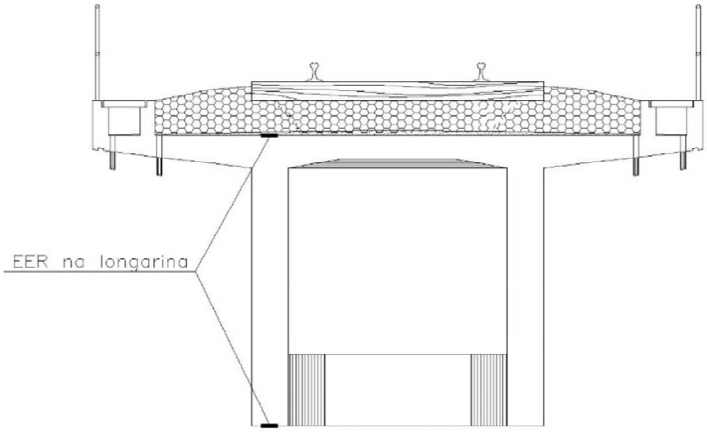


Figura 4.8 – EER's fixados nos trilhos e nas longarinas

Para a fixação do extensômetro no concreto foi preciso retirar parte da camada de argamassa assim como do lastro da via e assim foi colado na região de concreto do viaduto com devida limpeza da área.

Para o extensômetro fixado na armadura inferior foi necessário abrir uma área do concreto na longarina até se atingir o ferro mais externo da primeira camada da viga.

4.3 Aquisição de Dados

Para aquisição dos dados utilizou-se o ADS 2000, sistema de aquisição extensômetria entre outras funções, a comunicação do sistema com o computador é feita através de rede Ethernet, ver Figura 4.9. Para aquisição dos dados foi utilizada uma frequência de amostragem de 100 Hz.

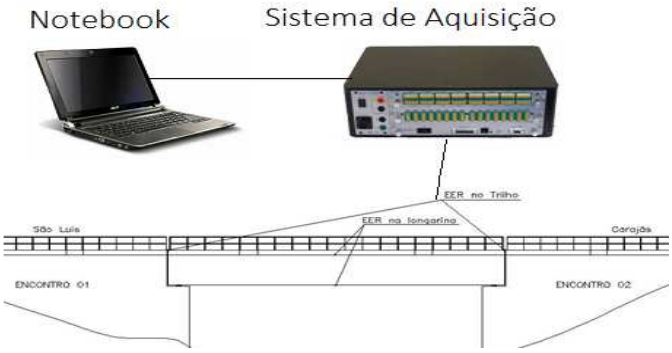


Figura 4.9 – Esquema do arranjo para aquisição dos dados utilizados

4.4 Determinação da Geometria do Trem

Para determinação da geometria ou caracterização do trem foi preciso inicialmente tratar a resposta (suavização) e retirar os efeitos dinâmicos presentes no sinal, para poder fazer a devida caracterização da locomotiva, como o espaçamento e distâncias entre eixos.

4.4.1 Filtragem do Sinal dos Extensômetros no Trilho

Este algoritmo tem grande importância para suavização do sinal e filtragem dos efeitos dinâmicos. O primeiro passo do algoritmo é o tratamento da resposta, a partir de uma média móvel simples, de ordem variável de acordo com o sinal obtido, conforme apresentado na equação (4.2). A figura 4.9 – a apresenta a série temporal de deformações, em $\mu m/m$, não tratada e a mesma suavizada, que na figura 4.9 – b está aproximada permitindo a percepção entre a suavização do sinal.

$$MMS = \frac{Valor_1 + Valor_2 + \cdots + Valor_n}{n} \tag{4.2}$$

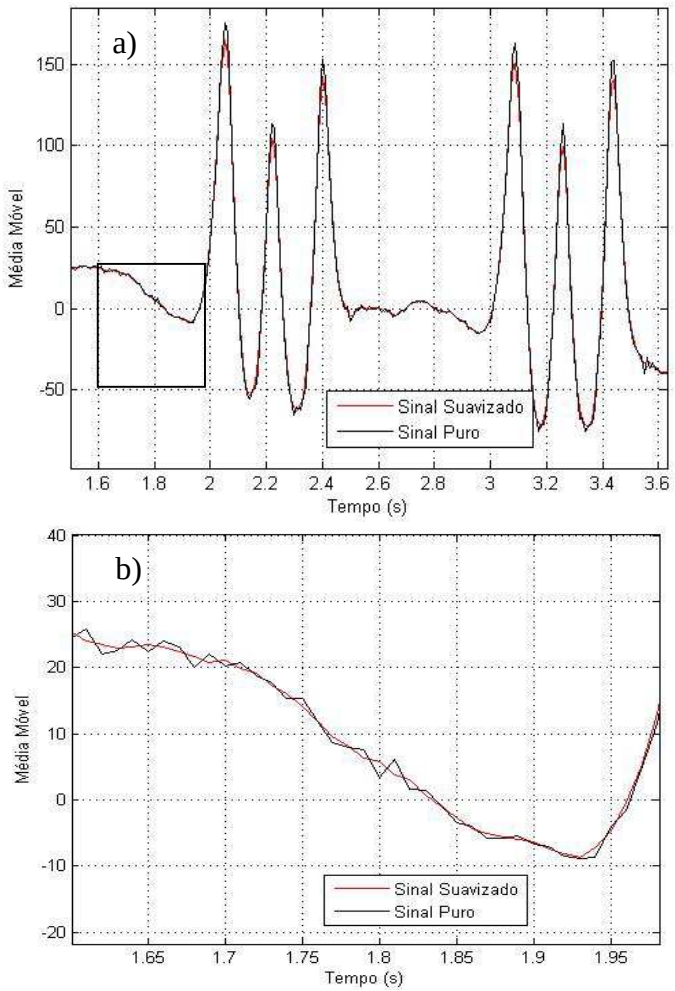


Figura 4.10 – a) Série temporal de deformações para um extensômetro fixado no trilho não tratado e tratado com uso da Média Móvel Simples (MMS); b) aproximação na série temporal para percepção entre o uso ou não da MMS

Na figura 4.9 é possível visualizar a suavização do sinal com o uso da MMS onde se retirou as imperfeições para uma melhor avaliação do sinal e obtenção dos resultados com melhor precisão.

4.4.2 Detecção dos Picos

A determinação dos picos é um ponto crucial para a definição da geometria do veículo. A passagem de um eixo do veículo sobre a seção instrumentada do trilho gera um pico na série temporal de deformações e com isso é possível identificar o número e o espaçamento entre eixos. Porém, é preciso antes distinguir o que é um pico e assim os identificar. Para isso usou-se o algoritmo "peakfinder", anexo C, implementado por Yoder (2011) no MATLAB®, que tem como parâmetros de entrada:

a) O vetor que será analisado;
b) Informar a quantidade de dados para cima em torno de um pico a ser identificado. Valores maiores significam que o algoritmo será mais seletivo na busca de picos;
c) Informar um threshold;
d) Entrar com o extremo: 1 quando se deseja o máximo, -1 se desejar o mínimo.

A saída da rotina são os picos e seus respectivos tempos (em segundos). Com os dados devidamente tratados, foi feita a detecção dos picos através do algoritmo "peakfinder". Na Figura 4.11 observa-se os seis picos que correspondem a passagem dos seis eixos da locomotiva sobre as seções do trilho instrumentados no lado de São Luiz e Carajás obtidos com uso dos anexos C e D.

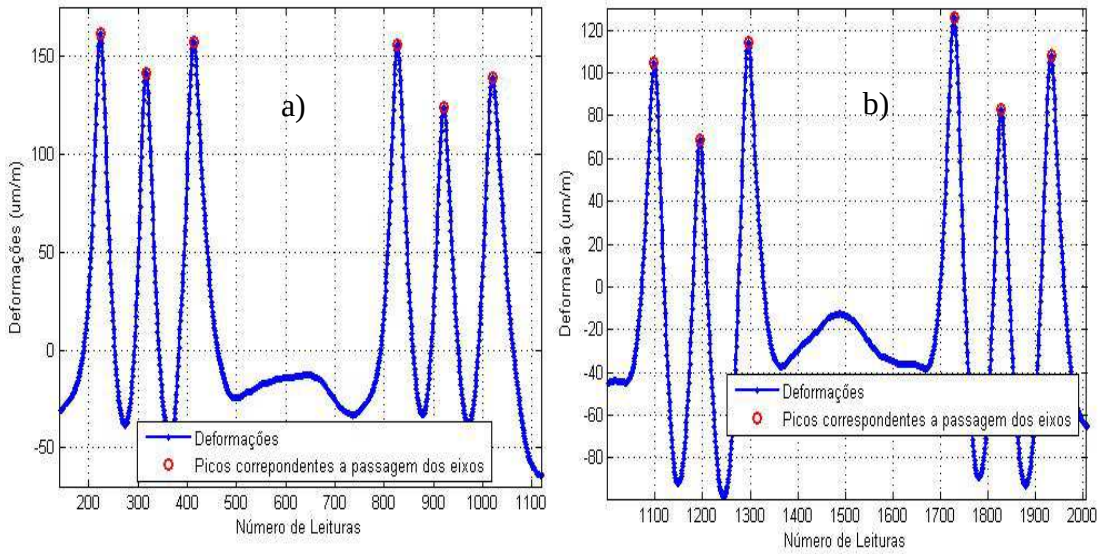


Figura 4.11 – Picos obtidos dos sinais de deformação no trilho. a) EER fixado para o lado de São Luis; b) EER fixado para o lado de Carajás

O intervalo de tempo decorrente da passagem de um mesmo eixo nas duas seções instrumentadas é calculado a partir da diferença entre o número da leitura entre as amostras dividida pela taxa de amostragem na aquisição do sinal que foi de 100 Hz.

4.4.3 Cálculo da Velocidade e das Distâncias entre Eixos

O cálculo da velocidade, anexo E, foi feito de acordo a lei do M.R.U., pois a partir das informações dos instantes onde ocorreram os máximos e da distância entre os extensômetros, pôde-se calcular a velocidade de passagem da locomotiva por eixo e a média, ver figura 4.11.

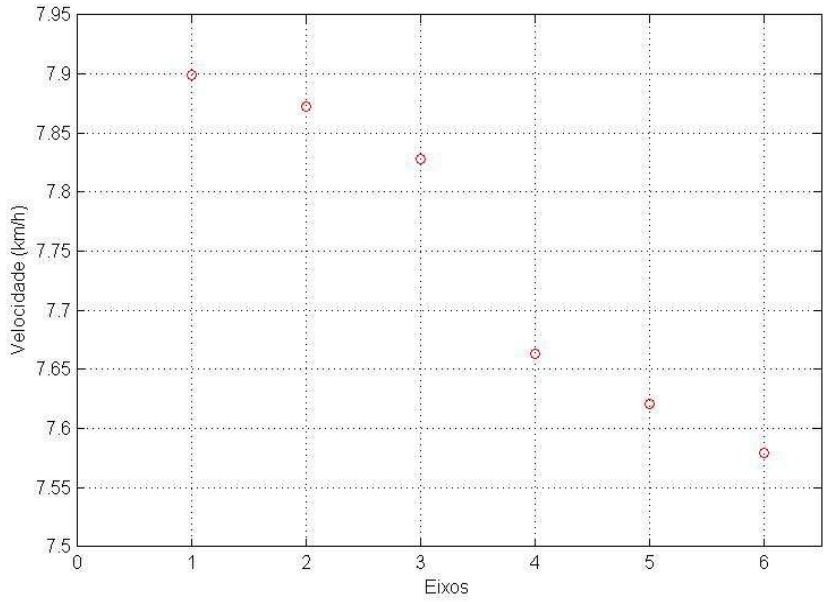


Figura 4.12 – Velocidade por eixo obtida para uma série temporal devido a passagem de uma locomotiva DASH-9

A velocidade média obtida foi de 7,74 km/h para o sinal analisado. Com a velocidade média calculada e os máximos detectados, encontrou-se o espaçamento entre os eixos da locomotiva. A distância entre os eixos atingiu valores bastante próximos aos valores reais. Para essa análise foram tomados como referência os espaçamentos entre eixos da locomotiva DASH-9, mais usual na empresa VALE, porém a mesma possui uma frota com outros modelos de locomotiva que possuem algumas diferenças entre a distância entre eixos.

Tabela 4.2 – Comparação entre as distâncias entre eixos reais e obtidas

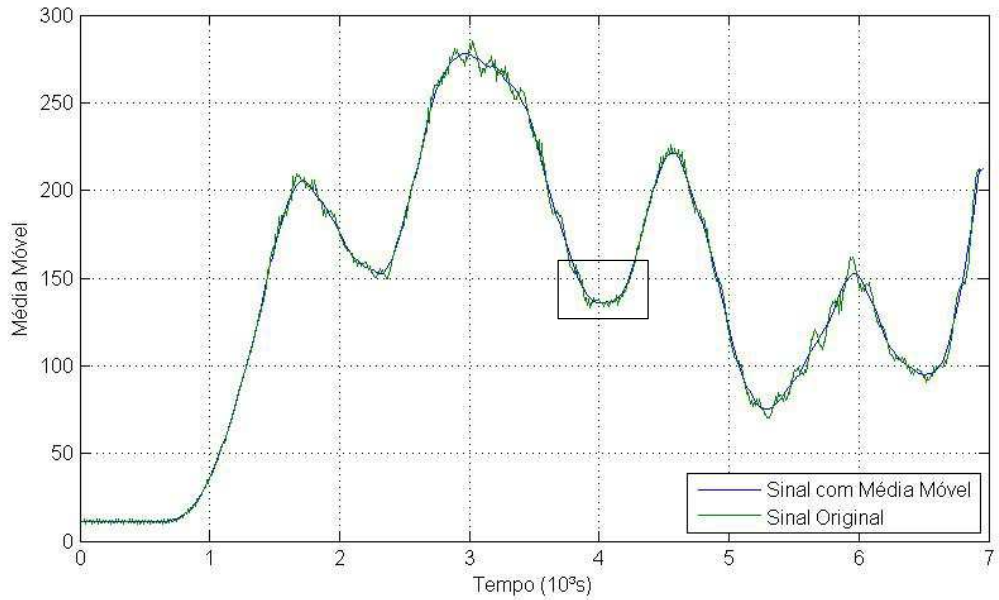
Distância Real (m)	Distância Obtida (m)	Diferença (m)
0	0	0
2,0193	2,0324	0,0131
2,1209	2,1198	0,0010
10,0838	9,0475	1,0362
2,1209	2,0542	0,0666
2,0193	2,1854	0,1661

4.5 Obtenção da Série Temporal de Momento Fletor

A obtenção da série temporal de momento fletor a partir dos valores de deformação do sinal tratado foi feita com base em modelos constitutivos para os materiais empregados e na teoria de viga de Navier-Bernoulli.

4.5.1 Filtragem do Sinal dos Extensômetros na Longarina

O tratamento do sinal foi feito como descrito no item 4.4.1 para os extensômetros fixados na longarina do viaduto. A Figura 4.13 – a apresenta a série temporal de deformações, em $\mu m/m$, não tratada e a mesma suavizada, que na Figura 4.13 – b está aproximada permitindo a percepção entre a suavização do sinal.



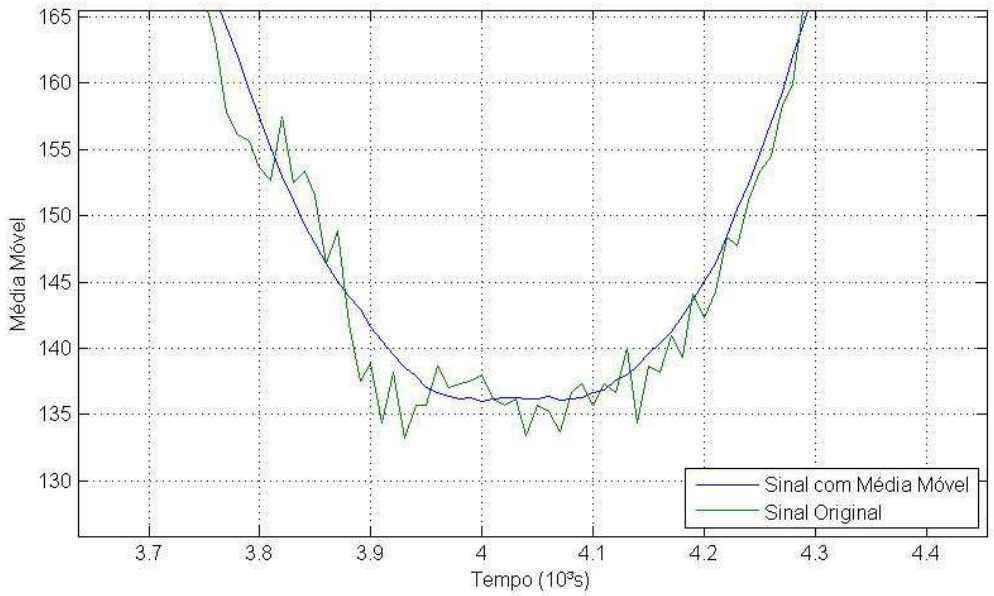


Figura 4.13 – Sinal de um extensômetro tratado com uso da Média Móvel Simples (MMS). Em verde Sinal Original (não tratado) e azul Sinal com Média Móvel (tratado)

Com o uso da MMS retirou-se os efeitos dinâmicos referentes a vibração da estrutura próximas às frequências naturais da mesma.

4.5.2 Modelos Constitutivos para os materiais

Para as situações de dados experimentais obtidos com leituras de extensômetros, têm-se a série temporal de deformações que precisam ser convertidas para série temporal de momento fletor. Para isso, foi necessário estudar o comportamento mecânico do concreto armado e definir relações entre as tensões e deformações do material. Essas relações foram definidas com base nos modelos constitutivos para o concreto e o aço para concreto armado.

4.5.2.1 Modelos constitutivos para o concreto

Existem diversos modelos para representar o comportamento mecânico do concreto, através de relações entre tensões e deformações. O modelo mais simples para representar tal comportamento é o modelo elástico linear. Outro, muito utilizado é o modelo plástico que tem por característica o surgimento de deformações residuais quando do descarregamento. Neste trabalho, serão adotados modelos elásticos não-lineares simplificados.

4.5.2.1.1 Modelo Constitutivo para o Concreto (ABNT NBR 6118/2007)

a) Compressão

Na compressão, para análises no estado limite último, podem ser empregados o diagrama tensão-deformação idealizado mostrado na Figura 4.14.

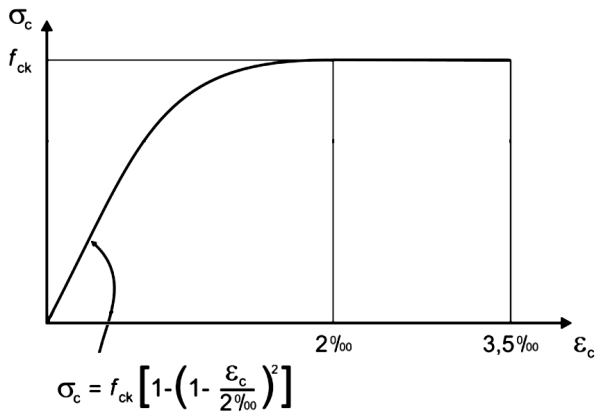


Figura 4.14 – Diagrama tensão-deformação idealizado (ABNT NBR 6118, 2007)

Portanto, a equação constitutiva do concreto para compressão fica como apresentado na equação (4.3).

$$\sigma_c = 0,85\, f_{ck}\left[1-\left(1-\frac{\varepsilon_c}{0,002}\right)^2\right] \text{ se } 0 \leq \varepsilon_c \leq 0,002$$

$$\sigma_c = 0,85\, f_{ck} \text{ se } 0,002 < \varepsilon_c \leq 0,0035 \qquad (4.3)$$

$$\sigma_c = 0 \text{ se } \varepsilon_c > 0,0035$$

Onde:

σ_c é a tensão de compressão;

f_{ck} é a resistência à compressão do concreto obtida no ensaio com os corpos-de-prova;

ε_c é a deformação no concreto.

b) Tração

Na tração, a ABNT NBR 6118 (2007) considera igual a 0 (zero) a resistência à tração do concreto, quando fissurado. No algoritmo considerou-se o concreto fissurado ao longo do seu comprimento, ocasionando em uma parcela nula do concreto referente a resistência à tração.

4.5.2.1.2 Modelo Constitutivo para as Curvas de Collins e Mitchell (1991)

a) Compressão

O modelo proposto por Collins e Mitchell (1991) apresenta uma família de curvas para comportamentos sob compressão e tração. O desempenho à compressão do concreto é definido pela equação (4.4).

$$\sigma_c = f_{ck}.\left[\frac{n\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{ck}}\right)}{n-1+\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{ck}}\right)^{nk}}\right] \text{ se } \varepsilon_c \geq 0 \qquad (4.4)$$

σ_c é a tensão de compressão;

f_{ck} é a resistência à compressão do concreto obtida no ensaio com os corpos-de-prova;

$n = 0,8 + \frac{f_{ck}}{17}$, com f_{ck} em MPa;

ε_c é a deformação no concreto;

$\varepsilon_{ck} = \frac{f_{ck}}{E_c}.\frac{n}{n-1}$, é a deformação no concreto correspondente à tensão máxima.

$k = 0,67 + \frac{f_{ck}}{62} \geq 1$, com f_{ck} em MPa;

b) Tração

A curva que modela o concreto sob tração tenta simular a contribuição do concreto entre fissuras (efeito *"tension-stiffening"*). Após a superação da deformação de fissuração na tração (ε_{cr}), o concreto ainda apresenta resistência devido à aderência entre as barras de aço e os maciços envolventes que existem nos trechos íntegros transferindo a tensão do aço

para o concreto através de esforços de compressão radial à barra. A resposta pós-fissuração da peça tensionada é considerada de uma maneira na qual a carga axial é compartilhada entre o concreto e o aço ao longo do comprimento do elemento, (Rêgo, 2005 *apud* Teixeira, 2009). A tensão de tração na armadura será maior na seção da fissura que nas adjacentes, pois a tensão no concreto é nula uma vez que houve transferência e, consequentemente, a ruptura por flexão ocorrerá numa seção que contém fissura. Nos processos tradicionais, esta suposição é desconsiderada sendo que a resposta da armadura é tomada como se ela estivesse descoberta na sua extensão. O modelo desenvolvido por Collins e Mitchell (1991) estima a média da contribuição do concreto à tração, a exemplo de vários outros trabalhos encontrados na literatura que propõem equações baseadas em resultados experimentais.

Portanto, a equação constitutiva do concreto para o modelo de Collins e Mitchell (1991) no caso de tração fica como apresentado na equação (4.5).

$$\sigma_c = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{1+\sqrt{500.\left(-\varepsilon_{c_t}\right)}} \text{ se } \varepsilon_c < 0 \ \& \ \varepsilon_{c_t} < \varepsilon_{cr} \tag{4.5}$$

$$\sigma_c = E_c.\varepsilon_{c_t} \text{ se } \varepsilon_{c_t} < 0 \ \& \ \varepsilon_{c_t} \geq \varepsilon_{cr}$$

Onde:

σ_c é a tensão à tração;

ε_{c_t} é a deformação no concreto;

$E_c = 3320 + \sqrt{f_{ck}} + 6900$, em MPa, é o módulo de elasticidade proposto;

α_1 é um coeficiente relativo à aderência entre a barra e o concreto (igual a 1,0 para barras nervuradas, 0,7 para barras lisas ou cordoalhas e 0 para barras soltas);

α_2 é um coeficiente relativo ao modo de carregamento (igual a 1,0 para carregamento monotônico de curta duração e 0,7 para carregamentos prolongado e/ou cíclicos).

4.5.2.2 Modelo constitutivo para o aço

Em concreto armado, as barras de aço são utilizadas apenas para resistir a esforços axiais, e por este motivo não mais que o conhecimento das propriedades em estado uniaxial de

tensões é necessário para uma modelagem satisfatória. De acordo com o processo de fabricação, o aço pode apresentar ou não patamar de escoamento. O modelo a ser descrito a seguir refere-se a aços que apresentam patamar de escoamento, Teixeira (2009).

4.5.2.2.1 Modelo elasto-plástico perfeito

A resposta tensão-deformação elasto-plástica perfeita é mostrada na

Figura 4.15. A relação é dada pela equação (4.6).

$$\begin{aligned} \sigma_s &= E_s.\varepsilon_s \text{ se } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ \sigma_s &= f_y \text{ se } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \text{ e } \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \\ \sigma_s &= 0 \text{ se } \varepsilon_s \geq \varepsilon_u \end{aligned} \tag{4.6}$$

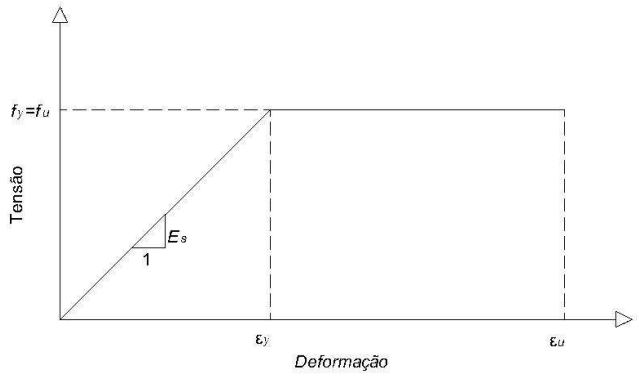


Figura 4.15 – Diagrama tensão-deformação do aço para concreto armado

4.5.2.3 Determinação do Esforço Solicitante Experimental

A determinação da série temporal de momentos fletores experimentais foi realizada pela metodologia descrita por Pureza (2013) com base na Teoria de viga de Navier-Bernoulli, que considera que as seções transversais planas, inicialmente, se mantêm planas e perpendiculares ao eixo da viga. Adotando-se o comportamento conjunto do aço e do concreto na viga, tem-se que a deformação em ponto qualquer da seção é o mesmo tanto para o concreto quanto para o aço. Com isso a partir da curvatura e da deformação no centro de gravidade é possível determinar a deformação em qualquer ponto da seção, ver Figura 4.16.

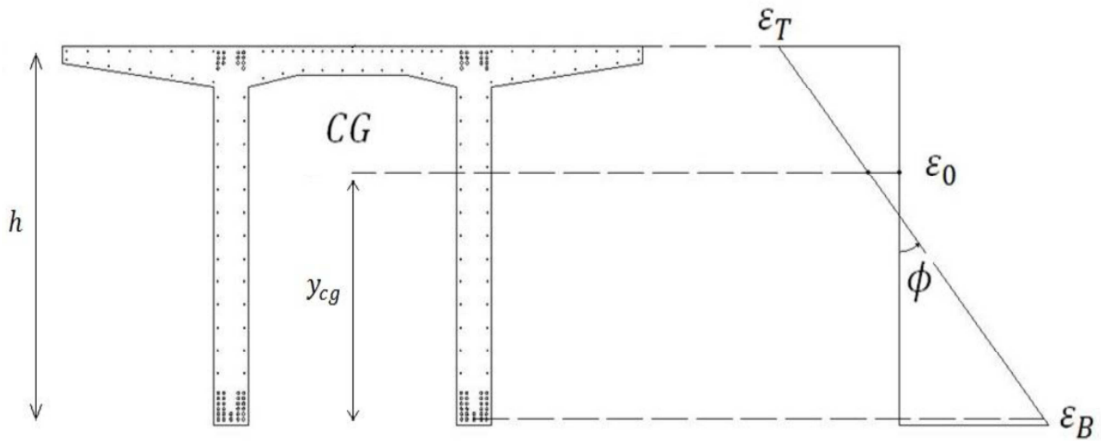


Figura 4.16 – Distribuição das deformações ao longo da altura da seção (Pureza, 2013)

Para a avaliação do concreto foi utilizado o processo das malhas ou camadas, que consiste na discretização da seção transversal em camadas de mesma espessura, Figura 4.17, orientadas paralelamente a um eixo de referência, considerando que as deformações são constantes dentro de uma camada. As tensões foram obtidas a partir dos modelos constitutivos dos materiais descritos anteriormente, e com a tensão de cada camada e de cada camada de armadura *j* obtém-se os esforços solicitantes para o aço e para o concreto no instante *i*, e a série temporal de momento fletor é o somatório das parcelas dos momentos fletores do aço e do concreto.

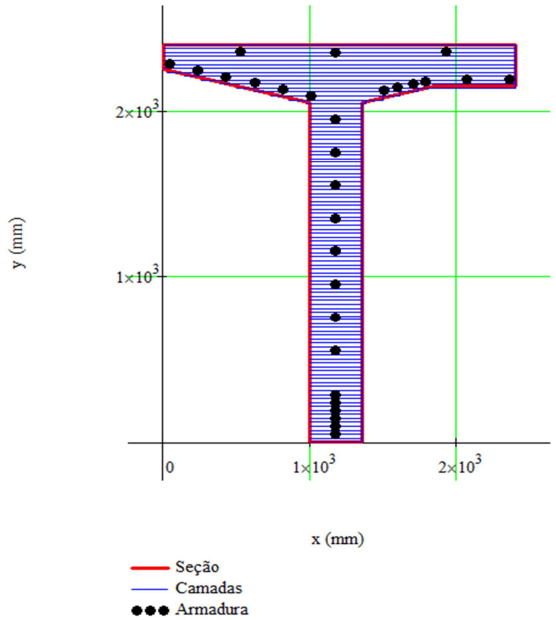


Figura 4.17 – Seção transversal discretizada em camadas com as barras de aço

$$M_{i,j} = A_{f_j} . \sigma_{f_{i,j}} . y_{f_j} \tag{4.7}$$

Onde:

A_f é a área da camada; σ_f é a tensão na camada; y_f é a altura da camada j.

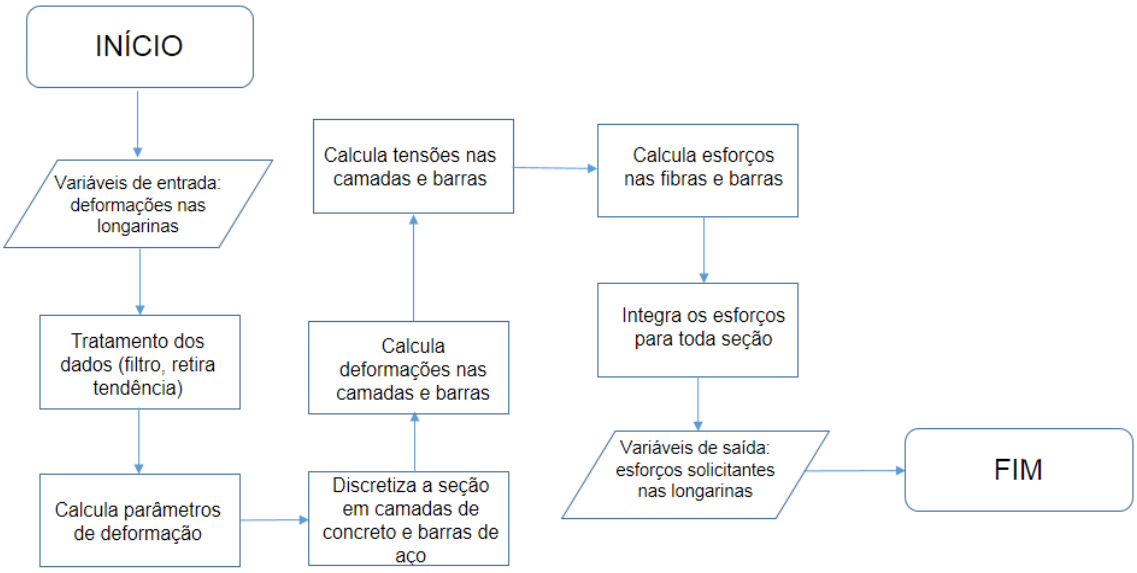


Figura 4.18– Fluxograma para o cálculo e armazenamento dos esforços solicitantes experimentais

A Figura 4.19 apresenta as séries temporais de momento fletor obtidas a partir dos modelos constitutivos adotados.

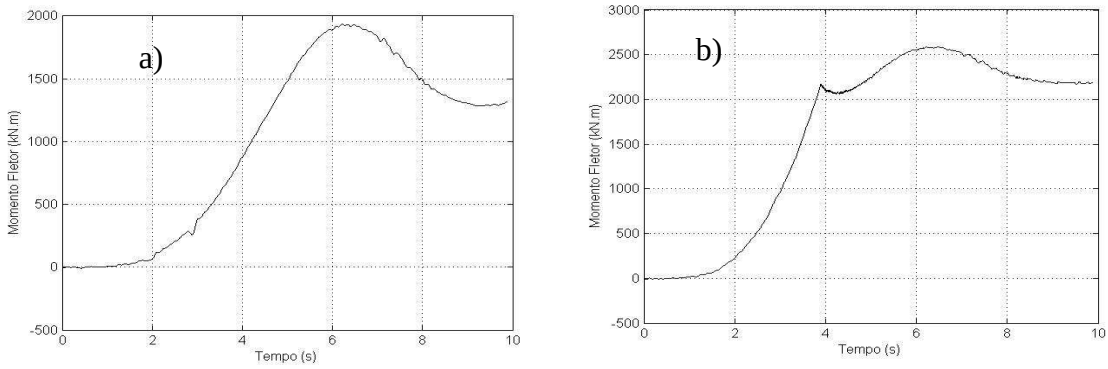


Figura 4.19 – Séries temporais de momento fletor obtidas para meia-seção. a) Com a equação da ABNT NBR 6118/2007; b) Com a equação de Collins e Mitchell (1991)

4.6 Determinação das Cargas por Eixo e do Peso Bruto Total

Com todos os dados de entrada determinados, calculou-se as cargas por eixo da locomotiva para as duas equações constitutivas consideradas. Devido a falta de um experimento com um veículo de peso conhecido para a determinação experimental da linha de influência, utilizou-se a linha de influência para velocidade de 1 m/s, determinada no item 3.8, por se

tratar de baixa velocidade do trem, e pouca interferência dos efeitos dinâmicos a essa velocidade.

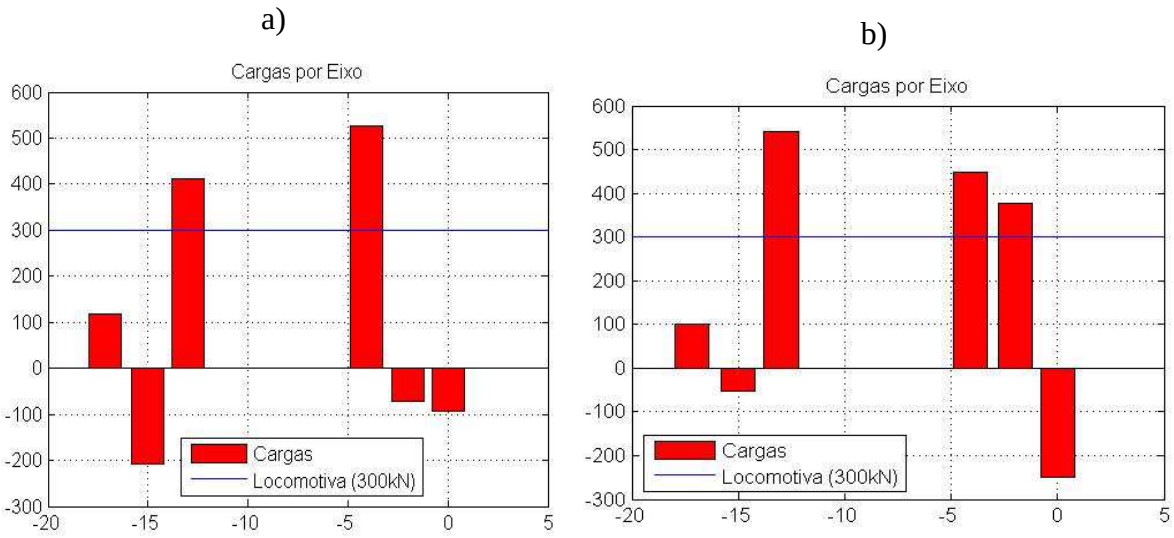


Figura 4.20 – Cargas por eixo da locomotiva. a) Equação. da ABNT NBR 6118/2007; b) Equação. de Collins e Mitchell (1991)

Tabela 4.3 – Comparação dos PBT's obtidos e o real de uma locomotiva

PBT Real	PBT (ABNT NBR 6118/2003)	PBT (Collins & Mitchell)
1800 kN	1425,57 kN	1768,61 kN
Erros	20,80%	1,74%

Da Figura 4.20 remete-se nas duas situações que estão sendo encontradas cargas negativas, o que inexiste, mesmo que se analisem os valores absolutos, ainda assim há grande discrepância entre os valores reais (300 kN). Por outro lado, quando se analisa os PBT's, Tabela 4.3, percebe-se que os pesos ficam próximos do valor esperado se for usada a equação constitutiva de Collins e Mitchell (1991).

Essa análise permitiu a conclusão de que para o exemplo estudado que é o de um viaduto em concreto armado, o sistema B-WIM determina de forma ótima o peso bruto total do veículo, porém com flutuações nos valores de carga, ocorrendo dessa maneira uma distribuição dos erros relativos dos pesos ao longo dos eixos, necessitando de um melhoramento através de técnicas de otimização.

5 Conclusões

Os algoritmos empregados nessa pesquisa foram implementados e validados com sucesso na plataforma MATLAB® permitindo a sua posterior utilização em futuras monitorações de vias e obras de arte de ferrovias.

No exemplo numérico, considerando as velocidades operacionais dos trens de minério, para uma ponte de 18 metros de vão, encontraram-se erros médios de até 13% para a carga por eixo, sendo que não houve influência da velocidade para o peso bruto total (PBT) da composição. Os resultados das cargas por eixo para velocidades até 40 km/h apresentaram erros médios de até 5,8% , enquanto que para velocidades superiores o erro médio chegou a 12,8%, todavia apesar do aumento do erro médio das cargas por eixo, o peso bruto total não foi alterado havendo uma distribuição dos erros ao longo dos eixos, os erros do PBT até 0,08%.

O algoritmo “Calcula_TimeHistory” desenvolvido para gerar cargas nodais em modelos de elementos finitos para simular cargas móveis permitiu a redução do tempo de análise em até 96% quando comparado com a função “Multi-Step” do SAP2000® que simula automaticamente as cargas móveis no modelo. Esse algoritmo pode ser utilizado para análise de pontes sujeitas a cargas móveis em programas de elementos finitos que não possuam essa ferramenta disponível.

O viaduto sobre a 1ª travessia da CFN da Estrada de Ferro Carajás mostrou-se apropriado para aplicação da técnica, uma vez que as frequências das passagens dos eixos estão afastadas das frequências naturais da estrutura. Mesmo assim, nas análises realizadas a partir das medições experimentais não foi possível identificar as cargas por eixo adequadamente, somente o peso bruto da locomotiva. Esse fato pode ser atribuído por não ter sido possível a calibração experimental da linha de influência da ponte e também pelo comportamento mais complexo do concreto armado sujeito a fissuração. Nesse caso, acredita-se que os resultados seriam melhores ao se trabalhar com uma estrutura em concreto protendido ou de aço.

Finalmente, o valor do peso bruto total da locomotiva determinado experimentalmente ficou muito próximo do valor esperado quando se utilizou a equação constitutiva para o concreto proposta por Collins e Mitchell (1991) ao invés das equações constitutivas normativas para o concreto.

Sugestões para trabalhos futuros

Para próximos trabalhos sugere-se avaliar a técnica Bridge-Weigh In Motion (B-WIM) em ferrovias a partir de dados experimentais utilizando-se pontes com arranjos e vãos semelhantes constituídas por diferentes materiais tais como pontes de aço e concreto protendido. A utilização de técnicas de otimização apropriadas para calibrar a linha de influência da ponte diminuindo os erros nas cargas por eixo. Outra abordagem a ser feita é uma avaliação entre as técnicas B-WIM e WIM para a mesma estrutura, para a estimativa da influência do efeito dinâmico entre os dois sistemas.

Referências

Referências Citadas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118**: Projetos de Estruturas de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

CALÇADA, R. A. B. **Efeitos Dinâmicos em Pontes Resultantes do Tráfego Ferroviário a Alta Velocidade**. 1995. 155 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1995.

COLLINS, M. P.; MITCHELL, D. **Prestressed Concrete Structures**. Nova Jersey, Prentice Hall, 1991.

GHALI, A.; NEVILLE A. M. **Structural analysis: a unified classical and matrix approach**. Londres, New York: E & FN SPON, 2009.

James, G. - **Analysis of Traffic Load Effects on Railway Bridges**.2003. 203 f PhD. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.

KAROUMI, R.; WIBERG, J.; LILJENCRANTZ, A. Monitoring traffic loads and dynamic effects using an instrumented railway bridge. **Engineering Structures**, 27. p., 1813-1819, 2005.

MARTHA, L. F., Notas de aula do curso de Análise de Estruturas II, Departamento de Engenharia, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2001.

Mathcad 14.0 M011 ©1986 - 2007, PTC - Parametric Technology Corporation, Inc, Kendrick Street, Needham – MA, EUA

MATLAB - Matrix Laboratory R2012b 8.0.0.783 ©1984 - 2012, Mathworks, Inc, 3 Apple Hill Drive, Natick - MA, EUA.

MOSES, F. **Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges**. Transportation Engineering Journal, v. 105, n. TE3, 233-249, May 1979.

NICAE. Equipe responsável: CARVALHO NETO, José A. de; PUREZA, Dennis Q.; COSTA, Fábio I. B. da; VELOSO, L. A. C. M.; SAMPAIO, Regina A. C.; RODRIGUES Jr, Sandoval J.; BARICHELLO, César V. M.; MOREIRA, Jouberson L. da R. **Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação da Integridade Estrutural de Pontes e Viadutos Ferroviários ao Longo da Estrada de Ferro Carajás**. Pará: NICAE-UFPA, 2009. 143 p. (Relatório Técnico Segunda Etapa: Obra de Arte Especial n. 01 - Viaduto sobre a Primeira Travessia).

PIMENTEL, R. M. C. M. **Caracterização do Tráfego Ferroviário e dos seus Efeitos em Pontes de Pequeno Vão**. 2008. 188 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

PUREZA, Dennis Q., **Avaliação de Segurança de Longarinas de Pontes Ferroviárias em Concreto Armado a partir de Dados Experimentais**. 2013. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programas de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

QUILLIGAN, M. **Bridge Weigh-In-Motion - Development of a 2-D Multi-Vehicle Algorithm**. 2003. 162 f. Licentiate Thesis – Department of Civil and Architectural Engineering, Structural Design and Bridge Division, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.

SAP2000 Advanced 14.1.0 – Structural Analysis Program, ©1976 – 2009, Computers and Structures, Inc, University Ave. Berkeley, CA, EUA.

SEEBLA (1972). **Estrada de Ferro Ponta da Madeira – Carajás, Obras de Arte Especiais Obra nº1 – Viaduto S/A EFSLT (1ª Travessia)**. São Paulo, 1978. 123 p. (Memória de Cálculo e Projetos).

TEIXEIRA, Ritermayer M. **Estudo Teórico-Experimental do Comportamento Estrutural de uma Ponte Ferroviária em Concreto Armado**. 2009. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

TIERNEY, O. F.; O'BRIEN, E. J.; PETERS, R. J. The Accuracy of Australian and European Culvert Weigh-in-Motion Systems. In: NATIONAL TRAFFIC DATA ACQUISITION CONFERENCE, 1996, Albuquerque – USA.

TOLEDO DO BRASIL. **Trainweigh - Solução para pesagem dinâmica ou estática de veículos ferroviários**. 2005. Disponível em: < http://logismarket.ind.br/ip/toledo-do-brasil-industria-de-balancas-trainweigh-trainweigh-770971.pdf >. Acesso 13 março de 2013.

UE - União Europeia. COST 323 - **Weigh In Motion Of Road Vehicles**. Luxemburgo, 1998.

VALE - GAEPG – PPCV e Engenharia - Equipe de Inspeção de Obras de Arte Especiais. **RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DO VIADUTO SOBRE A EFSLT (1º Travessia)**. Maranhão: DILO – VALE, 2003. 80 p.

YODER, N. **PeakFinder**. 2011 Disponível em: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25500-peakfinder> Acesso 19 de abril de 2013.

ZNIDARIC, A.; BAUMGÄRTNER, W. Bridge Weigh-in-Motion Systems – an Overview. In: PRE-PROCEDINGS OF 2nd EUROPEAN CONFERENCE ON WEIGH-IN-MOTION OF ROAD VEHICLES, 1998, Lisbon.

Referências Não Citadas

ADAMS, R.; DOYLE, J. F. **Multiple Force Identification for Complex Structures**. Experimental Mechanics, v. 42, n. 1, March 2002.

ASSIS, W.S.; TRAUTWEIN, L. M.; BITTENCOURT, T. N.; CONCEICAO NETO, A. P. Structural health monitoring of a steel railway bridge on the river Suaçuí. In: IABMAS 2012 - 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa - Itália. **Bridge Maintenance, Safety and Management**. Leiden - Holanda: CRC Press, 2012. v. 1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7187**: Projetos de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7188**: Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190**: Projetos de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BEGHETTO, F. L. M. **Efeitos Dinâmicos em Modelo de Veículo e Ponte Ferroviária diante da Variação de Velocidade e Irregularidades Verticais da Via**. 2006. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006.

BEGHETTO, F. L. M. **Modelagem Tridimensional da Interação Dinâmica entre Veículo e Ponte Ferroviária considerando Contato Roda-Trilho, Irregularidades da Via e Variação da Velocidade**. 2011. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2011.

CARVALHO NETO, J. A.; VELOSO, L. A. C. M.; SAMPAIO, R. A. C. Determinação das Propriedades Modais do Viaduto Ferroviário sobre a 1ª Travessia da EFC, In: XXXIV Jornadas Sulamericanas de Ingeniería Estructural, San Juan - Argentina, **XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural**, San Juan - Argentina, 2010.

CASTRO, C. H. L. de. **Análise Dinâmica de uma Ponte em Concreto Armado**. 2012. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

CHOPRA, Anil K. **Dynamics of Structures: theory and applications to earthquake**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995.

CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. **Dynamics of Structures**. Berkeley: Computers & Structures, 2003.

GONZÁLEZ, A.; ROWLEY C.; O'BRIEN, E. J. **A General Solution to the Identification of Moving Vehicle Forces on a Bridge**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 75, n. 3, 335-354, January 2008.

GONZÁLEZ, A.; DOWLING, J.; O'BRIEN, E. J.; ZNIDARIC, A. **Testing of a Bridge Weigh-in-Motion Algorithm Utilizing Multiple Longitudinal Sensor Locations**. Journal of Testing and Evaluation, v. 40, n. 6, 1-14, September 2012.

GONZÁLEZ, I. **Study and Application of Modern Bridge Monitoring Techniques**. 2011. 102 f. Licentiate Thesis (Licentiate in Structural Engineering and Bridges) - Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Structural Engineering and Bridges, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2011.

MAMEDE, A. L. G. **Simulações de modelos dinâmicos com amortecimento não-proporcional**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

NEGRI, L.; NIED, A.; KALINOWSKI, H.; PATERNO, A. **Benchmark for Peak Detection Algorithms in Fiber Bragg Grating Interrogation and a New Neural Network for its Performance Improvement**. Sensors, v. 11, n. 4, 3466-3482, March 2011.

NUNES, N. L.; CONCEIÇÃO NETO, A. P.; NAKAGUMA, R. K. Medição de carga estática por eixo dos trens da Linha 3 - Vermelha do Metrô de São Paulo. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves - Brasil. **Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo - Brasil: IBRACON, 2007.

PANAMBRA. **KYOWA – Catálogo do produto Strain Gage série/modelo KFG para uso geral**. Disponível em: < http://www.panambra.com/fw-uploads/2013-04-24-03-04-01_kfg_engy(8).pdf >. Acesso em 20 de janeiro de 2014.

ROWLEY C.; O'BRIEN, E. J.; GONZÁLEZ, A.; ZNIDARIC A. **Experimental Testing of a Moving Force Identification Bridge Weigh-in-Motion Algorithm**. Experimental Mechanics, v. 49, n. 5, 743-746, October 2009.

SILVA, Júlio M. M. **Modal Analysis and Testing**. Semsibra: Kluwer Academic Publishers e NATO Science Series, 1998.

TOLEDO, R. C. P. L. **Um Estudo sobre Métodos de Integração Direta para a Análise Dinâmica Não-Linear de Estruturas**. 1983. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1983.

YAMAGUCHI, E.; KAWAMURA, S; MATUSO, K.; MATSUKI, Y.; NAITO, Y. **Bridge-Weigh-In-Motion by Two-Span Continuous Bridge with Skew and Heavy-Truck Flow in Fukuoka Area, Japan**. Advances in Structural Engineering, v. 12, n. 1, July 2009.

ZHAO, H.; UDDIN, N. Algorithm to Identify Axle Weights for an Innovative BWIM System-Part I. In: IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II, Dhaka – India. 2010.

Anexos

Anexo A: Algoritmo para gerar o trem

```
% Dados Trem (Calcula Time History - monta vetor 'xp' e 'a')
% Feito por: José Alves de Carvalho Neto
% Dissertação de Mestrado
% 24/03/2013

clear

% Dados de Entrada
cargaloc=300; %valor em kN (valor a ser lançado nos nós no SAP)
cargavag=325; %valor em kN (valor a ser lançado nos nós no SAP)

% Geometria do trem
% Locomotiva
dl1=-2.0193;   %distância do 1º para o 2º eixo e do 5º para o 6º eixo da locomotiva (m)
dl2=-2.1209;   %distância do 2º para o 3º eixo e do 4º para o 5º eixo da locomotiva (m)
dl3=-10.08384; %distância do 3º para o 4º eixo da locomotiva (m)

% Vagão
dv1=-1.8288;   %distância do 1º para o 2º eixo e do 3º para o 4º eixo da locomotiva (m)
dv2=-3.532;    %distância do 2º para o 3º eixo da locomotiva (m)

% Distâncias entre fins de locomotiva e vagão
dll=-3.6831;   %distância entre o último e o primeiro eixo de locomotivas
dvv=-2.54;     %distância entre o último e o primeiro eixo de vagões
dlv=-3.1116;   %distância entre o último e o primeiro eixo de locomotiva e vagões ou vice-versa

% Monta 1ª locomotiva
for j=1:6;
   if j<=2;
   loc(j)=dl1*(j-1);
   elseif j>2 & j<=3;
      loc(j)=dl2+loc(2);
      elseif j>3 & j<=4;
      loc(j)=dl3+loc(3);
      elseif j>4 & j<=5;
      loc(j)=dl2+loc(4);
   else j>5 & j<=6;
      loc(j)=dl1+loc(5);
   end
end

% Monta 2ª locomotiva
for j=1:12;
   if j<=6;
      loc2(j)=loc(j);
   else
      loc2(j)=dll+loc(j-6)+loc(6);
   end
end

% Monta vagão
for j=1:4;
   if j<=2;
   vag(j)=dv1*(j-1);
```

```
   else
      vag(j)=vag(2)+dv2+vag(2)*(j-3);
   end
end

% Multiplica vagões
for i=1:110;       %cria 110 vagões
   for j=1:4;
      vagoes((4*(i-1))+j)=(i-1)*(vag(end)+dvv)+vag(j);
   end
end

i=1:length(loc2);
carloc2(i)=cargaloc/cargaloc;

% j=1:length(vagoes);
% carvag(j)=cargavag/cargaloc;

vag1=loc2(end)+dlv+vagoes+loc(2); %organiza os n's vagões criados atrás da 2ª locomotiva
k=1:length(vag1);
carvag1(k)=cargavag/cargaloc;

loc3=loc+dlv+vag1(end);          %organiza a 3ª locomotiva atrás dos n's vagões
g=1:length(loc3);
carloc3(g)=cargaloc/cargaloc;

vag2=vagoes+dlv+loc3(end);       %organiza os n's vagões criados atrás da 3ª locomotiva
w=1:length(vag2);
carvag2(w)=cargavag/cargaloc;

loc4=loc+dlv+vag2(end);          %organiza a 4ª locomotiva atrás dos n's vagões
u=1:length(loc4);
carloc4(u)=cargaloc/cargaloc;

vag3=vagoes+dlv+loc4(end);       %organiza os n's vagões criados atrás da 4ª locomotiva
z=1:length(vag3);
carvag3(z)=cargavag/cargaloc;

xp=[loc2';vag1';loc3';vag2';loc4';vag3'];
a=[carloc2';carvag1';carloc3';carvag2';carloc4';carvag3'];

figure(1);
bar(xp,a,'r');
title('Cargas por Eixo (kN)');

trem=[xp a];
exporta=strcat('trem','.txt');
save (exporta,'trem','-ascii');
```

Anexo B: Algoritmo “Calcula_TimeHistory”.

```
% Calcula Função Time History (Geral)
% Feito por: José Alves de Carvalho Neto
% Dissertação de Mestrado
% 23/01/2013

clear;

dados=load('trem_2L4V.txt');

% Dados de Entrada

xp=dados(:,1); %vetor posição com distâncias absolutas do primeiro eixo(m)
a=dados(:,2); %coeficiente que leva em conta o peso de cada eixo, sempre terá a mesma dimensão do vetor xp

v=22.2222;              %velocidade(m/s)
dt=0.01;                %discretização(s)
desl=v*dt;              %incremento, deslocamento por discretização(m)
L=18;                   %comprimento da ponte(m)
nv=1;                   %número de vãos
np=((L-xp(end))/desl)+100; %número de passos(L+ Último Eixo)
Lv=L/nv;                %comprimento do vão(m)
nd=36;                  %número de divisões do vão

% Cálculo de Alguns Dados Importantes

d=L/(nv*nd);    %comprimento da divisão do vão (m)
ne=length(xp);  %número de eixos

%Cálcula o Vetor Tempo

for i=1:np
postrem(i)=xp(1)+desl*(i-1);
t(i)=postrem(i)/v;
end

for i=1:np
 for j=1:ne
```

```
 pt(i,j)=xp(j)+desl*(i-1);
 end
end

%Calcula Funções Eta

% Função Inicial
for i=1:np
 for j=1:ne
    if pt(i,j)<0 | pt(i,j)>d;
    fo(i,j)=0;
    else pt(i,j)>=0 & pt(i,j)<=d;
    fo(i,j)=(d-pt(i,j))/d;
    end
 end
end

% Função Intermediária
for k=1:L/d
 for i=1:np
    for j=1:ne
     if pt(i,j)<(k-1)*d | pt(i,j)>(k+1)*d;
     fint(k,i,j)=0;
     elseif pt(i,j)>=(k-1)*d & pt(i,j)<=k*d;
     fint(k,i,j)=a(j)*((pt(i,j)-((k-1)*d))/d);
     else pt(i,j)>k*d & pt(i,j)<=(k+1)*d;
     fint(k,i,j)=a(j)*(2-((pt(i,j)-(d*(k-1)))/d));
     end
    end
 end
end

% Função Final
for i=1:np
 for j=1:ne
    for k=1:L/d
     if pt(i,j)<(k-1)*d | pt(i,j)>L;
     ff(i,j)=0;
     else pt(i,j)>=(k-1)*d & pt(i,j)<=L;
     ff(i,j)=((pt(i,j)-((k-1)*d))/d);
     end
```

```
   end
 end
end

% Somatório das Funções Eta

bo=fo*a;
bint=sum(fint,3);
bf=ff*a;

% Consideração dos Momentos de Engaste (Cargas Nodais Equivalentes)

% Momento Inicial
for i=1:np
 for j=1:ne
   if pt(i,j)<0 | pt(i,j)>d;
   mo(i,j)=0;
   else pt(i,j)>=0 & pt(i,j)<=d;
   mo(i,j)=a(j)*(((pt(i,j))^3/d^2)-(2*((pt(i,j))^2)/d)+(pt(i,j)));
   end
 end
end

% Momento Intermediário (do lado "a" e "b")  -----> b    o    a <-----
                                        %PONTO%

% Lado b (considerado como o segundo ponto no trecho anterior)
for k=1:L/d
 for j=1:ne
   for i=1:np
    if pt(i,j)<(k-1)*d | pt(i,j)>k*d;
    mib(k,i,j)=0;
    else pt(i,j)>=k*d & pt(i,j)<=(k+1)*d;
    mib(k,i,j)=a(j)*(((pt(i,j)-(d*(k-1)))^3/d^2)-(2*((pt(i,j)-(d*(k-1)))^2)/d)+(pt(i,j)-(d*(k-1))));
    end
   end
 end
end

% Lado "a" (considerado como o primeiro ponto no trecho seguinte)
```

```
for k=1:L/d
 for j=1:ne
    for i=1:np
     if pt(i,j)<k*d | pt(i,j)>(k+1)*d;
     mia(k,i,j)=0;
     else pt(i,j)>=k*d & pt(i,j)<=(k+1)*d<=L;
     mia(k,i,j)=a(j)*(((pt(i,j)-(d*(k)))^3/d^2)-(((pt(i,j)-(d*(k)))^2)/d));
     end
    end
 end
end

% Momento Final
for i=1:np
 for j=1:ne
    for k=1:L/d
     if pt(i,j)<(k-1)*d | pt(i,j)>L;
     mf(i,j)=0;
     else pt(i,j)>=(k-1)*d & pt(i,j)<=L;
     mf(i,j)=a(j)*((((pt(i,j)-(k-1)*d))^3/d^2)-(((pt(i,j)-(k-1)*d))^2)/d);
     end
    end
 end
end

% Somatório dos Momentos de cada Eixo

Mo=sum(mo,2);

ma=sum(mia,3);
mb=sum(mib,3);
Mi=mb-ma;

Mf=sum(mf,2);

% Salva arquivos .txt das funções

tempo=t';

armazenabo=[tempo bo];
```

```
arquivosaidabo=strcat('bo','.txt');
save (arquivosaidabo,'armazenabo','-ascii');

[nl,nc] = size(bint);
for i = 1:nl-1,
   vetb = [tempo bint(i,:)'];
   filename = ['bint',num2str(i),'.txt'];
   save(filename,'vetb','-ascii');
end

armazenabf=[tempo bf];
arquivosaidabf=strcat('bf','.txt');
save (arquivosaidabf,'armazenabf','-ascii');

armazenaMo=[tempo Mo];
arquivosaidaMo=strcat('Mo','.txt');
save (arquivosaidaMo,'armazenaMo','-ascii');

[linha,coluna] = size(Mi);
for i = 1:linha-1,
   vetM = [tempo Mi(i,:)'];
   filename = ['Mi',num2str(i),'.txt'];
   save(filename,'vetM','-ascii');
end

armazenaMf=[tempo Mf];
arquivosaidaMf=strcat('Mf','.txt');
save (arquivosaidaMf,'armazenaMf','-ascii');
```

Anexo C: Algoritmo Peakfinder (Yoder, 2011).

```
function varargout = peakfinder(x0, sel, thresh, extrema)
%PEAKFINDER Noise tolerant fast peak finding algorithm
%   INPUTS:
%       x0 - A real vector from the maxima will be found (required)
%       sel - The amount above surrounding data for a peak to be
%           identified (default = (max(x0)-min(x0))/4). Larger values mean
%           the algorithm is more selective in finding peaks.
%       thresh - A threshold value which peaks must be larger than to be
%           maxima or smaller than to be minima.
%       extrema - 1 if maxima are desired, -1 if minima are desired
%           (default = maxima, 1)
%   OUTPUTS:
%       peakLoc - The indicies of the identified peaks in x0
%       peakMag - The magnitude of the identified peaks
%
%   [peakLoc] = peakfinder(x0) returns the indicies of local maxima that
%       are at least 1/4 the range of the data above surrounding data.
%
%   [peakLoc] = peakfinder(x0,sel) returns the indicies of local maxima
%       that are at least sel above surrounding data.
%
%   [peakLoc] = peakfinder(x0,sel,thresh) returns the indicies of local
%       maxima that are at least sel above surrounding data and larger
%       (smaller) than thresh if you are finding maxima (minima).
%
%   [peakLoc] = peakfinder(x0,sel,thresh,extrema) returns the maxima of the
%       data if extrema > 0 and the minima of the data if extrema < 0
%
%   [peakLoc, peakMag] = peakfinder(x0,...) returns the indicies of the
%       local maxima as well as the magnitudes of those maxima
%
%   If called with no output the identified maxima will be plotted along
%       with the input data.
%
%   Note: If repeated values are found the first is identified as the peak
%
% Ex:
% t = 0:.0001:10;
% x = 12*sin(10*2*pi*t)-3*sin(.1*2*pi*t)+randn(1,numel(t));
```

```
% x(1250:1255) = max(x);
% peakfinder(x)
%
% Copyright Nathanael C. Yoder 2011 (nyoder@gmail.com)

% Perform error checking and set defaults if not passed in
error(nargchk(1,4,nargin,'struct'));
error(nargoutchk(0,2,nargout,'struct'));

s = size(x0);
flipData =  s(1) < s(2);
len0 = numel(x0);
if len0 ~= s(1) && len0 ~= s(2)
   error('PEAKFINDER:Input','The input data must be a vector')
elseif isempty(x0)
   varargout = {[],[]};
   return;
end
if ~isreal(x0)
   warning('PEAKFINDER:NotReal','Absolute value of data will be used')
   x0 = abs(x0);
end

if nargin < 2 || isempty(sel)
   sel = (max(x0)-min(x0))/4;
elseif ~isnumeric(sel) || ~isreal(sel)
   sel = (max(x0)-min(x0))/4;
   warning('PEAKFINDER:InvalidSel',...
      'The selectivity must be a real scalar.  A selectivity of %.4g will be used',sel)
elseif numel(sel) > 1
   warning('PEAKFINDER:InvalidSel',...
      'The selectivity must be a scalar.  The first selectivity value in the vector will be used.')
   sel = sel(1);
end

if nargin < 3 || isempty(thresh)
   thresh = [];
elseif ~isnumeric(thresh) || ~isreal(thresh)
   thresh = [];
   warning('PEAKFINDER:InvalidThreshold',...
      'The threshold must be a real scalar. No threshold will be used.')
```

```
elseif numel(thresh) > 1
    thresh = thresh(1);
    warning('PEAKFINDER:InvalidThreshold',...
        'The threshold must be a scalar.  The first threshold value in the vector will be used.')
end

if nargin < 4 || isempty(extrema)
    extrema = 1;
else
    extrema = sign(extrema(1)); % Should only be 1 or -1 but make sure
    if extrema == 0
        error('PEAKFINDER:ZeroMaxima','Either 1 (for maxima) or -1 (for minima) must be input for
extrema');
    end
end

x0 = extrema*x0(:); % Make it so we are finding maxima regardless
thresh = thresh*extrema; % Adjust threshold according to extrema.
dx0 = diff(x0); % Find derivative
dx0(dx0 == 0) = -eps; % This is so we find the first of repeated values
ind = find(dx0(1:end-1).*dx0(2:end) < 0)+1; % Find where the derivative changes sign

% Include endpoints in potential peaks and valleys
x = [x0(1);x0(ind);x0(end)];
ind = [1;ind;len0];

% x only has the peaks, valleys, and endpoints
len = numel(x);
minMag = min(x);


if len > 2 % Function with peaks and valleys

    % Set initial parameters for loop
    tempMag = minMag;
    foundPeak = false;
    leftMin = minMag;

    % Deal with first point a little differently since tacked it on
    % Calculate the sign of the derivative since we taked the first point
```

```
%  on it does not neccessarily alternate like the rest.
signDx = sign(diff(x(1:3)));
if signDx(1) <= 0 % The first point is larger or equal to the second
    ii = 0;
    if signDx(1) == signDx(2) % Want alternating signs
        x(2) = [];
        ind(2) = [];
        len = len-1;
    end
else % First point is smaller than the second
    ii = 1;
    if signDx(1) == signDx(2) % Want alternating signs
        x(1) = [];
        ind(1) = [];
        len = len-1;
    end
end

% Preallocate max number of maxima
maxPeaks = ceil(len/2);
peakLoc = zeros(maxPeaks,1);
peakMag = zeros(maxPeaks,1);
cInd = 1;
% Loop through extrema which should be peaks and then valleys
while ii < len
    ii = ii+1; % This is a peak
    % Reset peak finding if we had a peak and the next peak is bigger
    %   than the last or the left min was small enough to reset.
    if foundPeak
        tempMag = minMag;
        foundPeak = false;
    end

    % Make sure we don't iterate past the length of our vector
    if ii == len
        break; % We assign the last point differently out of the loop
    end

    % Found new peak that was lager than temp mag and selectivity larger
    %   than the minimum to its left.
    if x(ii) > tempMag && x(ii) > leftMin + sel
```

```
            tempLoc = ii;
            tempMag = x(ii);
        end

        ii = ii+1; % Move onto the valley
        % Come down at least sel from peak
        if ~foundPeak && tempMag > sel + x(ii)
            foundPeak = true; % We have found a peak
            leftMin = x(ii);
            peakLoc(cInd) = tempLoc; % Add peak to index
            peakMag(cInd) = tempMag;
            cInd = cInd+1;
        elseif x(ii) < leftMin % New left minima
            leftMin = x(ii);
        end
    end

    % Check end point
    if x(end) > tempMag && x(end) > leftMin + sel
        peakLoc(cInd) = len;
        peakMag(cInd) = x(end);
        cInd = cInd + 1;
    elseif ~foundPeak && tempMag > minMag % Check if we still need to add the last point
        peakLoc(cInd) = tempLoc;
        peakMag(cInd) = tempMag;
        cInd = cInd + 1;
    end

    % Create output
    peakInds = ind(peakLoc(1:cInd-1));
    peakMags = peakMag(1:cInd-1);
else % This is a monotone function where an endpoint is the only peak
    [peakMags,xInd] = max(x);
    if peakMags > minMag + sel
        peakInds = ind(xInd);
    else
        peakMags = [];
        peakInds = [];
    end
end
```

```
% Apply threshold value.  Since always finding maxima it will always be
%   larger than the thresh.
if ~isempty(thresh)
    m = peakMags>thresh;
    peakInds = peakInds(m);
    peakMags = peakMags(m);
end




% Rotate data if needed
if flipData
    peakMags = peakMags.';
    peakInds = peakInds.';
end

% Change sign of data if was finding minima
if extrema < 0
    peakMags = -peakMags;
    x0 = -x0;
end
% Plot if no output desired
if nargout == 0
    if isempty(peakInds)
        disp('No significant peaks found')
    else
        figure;
        plot(1:len0,x0,'.-',peakInds,peakMags,'ro','linewidth',2);
        grid on
    end
else
    varargout = {peakInds,peakMags};
end
```

Anexo D: Algoritmo para determinação dos máximos

```
% Determina Máximos (distância entre eixos)
% Feito por: José Alves de Carvalho Neto
% Dissertação de Mestrado
% 25/02/2013

clear
load 'yycarregado_10km_2loc4vag.txt';

passo=yycarregado_10km_2loc4vag(:,1);
entradacrj=yycarregado_10km_2loc4vag(:,2);
entradasl=yycarregado_10km_2loc4vag(:,3);

% passoo=yyo2loc(:,1);
% entradao=yyo2loc(:,2);
%
% passof=yyf2loc(:,1);
% entradaf=yyf2loc(:,2);

cortantecrj=entradacrj(:)-entradacrj(1);
max(cortantecrj);
min(cortantecrj);

cortantesl=entradasl(:)-entradasl(1);
max(cortantesl);
min(cortantesl);

% Comentários a respeito do sinal ENSAIO02_vgtanque_vgHAT_SE
% usar sel = max(cortante)/2.5 para o início do sinal e;
% usar sel = max(cortante)/10 para o fim do sinal.

selcrj=max(cortantecrj)/2.5;
peakfinder(cortantecrj,selcrj,0,1);
[tempocrj picocrj]=peakfinder(cortantecrj,selcrj,0,1);

selsl=max(cortantesl)/2.5;
peakfinder(cortantesl,selsl,0,1);
[temposl picosl]=peakfinder(cortantesl,selsl,0,1);

maximocrj=[tempocrj/100 picocrj];
arqsaidamaximocrj=strcat('deteccaomaximo_CRJ_carregado_2loc4vag','.txt');
save (arqsaidamaximocrj,'maximocrj','-ascii');

maximosl=[temposl/100 picosl];
arqsaidamaximosl=strcat('deteccaomaximo_SL_carregado_2loc4vag','.txt');
save (arqsaidamaximosl,'maximosl','-ascii');
```

Anexo E: Algoritmo para cálculo da velocidade

```
% Calcula Velocidade para cada pico e a média das velocidades para 2 SINAIS
% Criado por José Alves de Carvalho Neto
% Dissertação de Mestrado
% 22/04/2013

clear all
L=19.2;    % Distância entre sensores(m)
load 'deteccaomaximo_CRJ_ENSAIO08_carregado_1loc.txt';
timeo=deteccaomaximo_CRJ_ENSAIO08_carregado_1loc(:,1);

load 'deteccaomaximo_SL_ENSAIO08_carregado_1loc.txt';
timef=deteccaomaximo_SL_ENSAIO08_carregado_1loc(:,1);

for i=1:length(timeo);
   zeit(i)=timeo(i)-timef(i);
   v(i)=L/zeit(i);
end
vm=sum(v)/length(v);
e=((v(1)-v(end))/v(1))*100;

j=1:length(timeo);

figure (1)
plot(j,v*3.6,'ro');
xlabel('Eixos');
ylabel('Velocidade (km/h)');
grid on;

figure (2)
plot(j,v,'ro');
xlabel('Eixos');
ylabel('Velocidade (m/s)');
grid on;

velocidade=v';
arquivosaidavelocidade=strcat('velocidades_m-s','.txt');
save (arquivosaidavelocidade,'velocidade','-ascii');
```

Anexo F: – Algoritmo para determinação do polinômio da Linha de influência

```
% Determina Polinômio da LI
% Feito por: José Alves de Carvalho Neto
% Dissertação de Mestrado
% 22/05/2013

load 'ordenadas_LI_vao60cm_aplicacargaunit.txt'

tempo=ordenadas_LI_vao60cm_aplicacargaunit(:,1);
mom=ordenadas_LI_vao60cm_aplicacargaunit(:,2);

v=0; %velocidade do trem (km/h)
L=19.2; %comprimento da ponte (m)

% Transforma do domínio do tempo (s) para o domínio do espaço (m)

% r=20;   %número de pontos por segundos desejados

% t=decimate(tempo,r);
% m=decimate(mom,r);
t=tempo;
m=mom;

% y=L/t(end);
y=1;
pos=y*t;

%mf=smooth(m,15,'moving');
mf=m;


figure (2);
plot(tempo,mf,'r-');
xlabel('Comprimento da Ponte (m)');
ylabel('Momento Fletor (kN/m)');
grid on;

curva=polyfit(tempo,mf,15);
ordenada=polyval(curva,pos);

figure (3);
plot(tempo,ordenada,tempo,mf);
xlabel('Comprimento da Ponte (m)');
ylabel('Momento Fletor (kN/m)');
grid on;
legend('Curva da LI','LI','location','southwest');


coeficienteLI=[curva'];
arquivocoeficienteLI=strcat('LI_',num2str(v),'.txt');
save (arquivocoeficienteLI,'coeficienteLI','-ascii','-double');
```

Anexo G: Algoritmo de Moses(1979)

```
% Determina Carga (Moses)
% Feito por: José Alves de Carvalho Neto
% Dissertação de Mestrado
% 27/02/2013



clear all

% Informar na linha 118 se a série está suavizada

% Carrega arquivo com a série temporal de momento fletor
load 'TH_80kmh.txt';    %carrega arquivo de momento fletor do SAP
momento=TH_80kmh;

% Carrega arquivo com coeficientes do polinômio da Linha de Influência
load 'LI_parausar.txt'; %carrega arquivo com os coeficientes da LI
LI=LI_parausar(:,1);

% Carrega arquivo dos máximos do DeterminaMaximo peakfinder
load 'TremVerificacao_2L4V.txt'; %carrega arquivo de dados do trem com distância entre eixos.
pos=TremVerificacao_2L4V(:,1);
carga=TremVerificacao_2L4V(:,2);

% Define coluna do tempo e do momento fletor
tempo=momento(:,1);
m=2*momento(:,2);

% Plota momento fletor
figure;
plot(tempo,m,'k');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Momento Fletor (kN.m)');
grid on;

% Dados de Entrada
L=18;                %comprimento do vão (m)
v=22.2222;           %velocidade (m/s)
```

```
vel=v*3.6;              %velocidade (km/h)
dt=(tempo(2)-tempo(1)); %discretização (s)
desl=v*dt;              %incremento, deslocamento por discretização (m)
np=length(m);           %número de passos

i=1:np;
t(i)=i*dt;

% Cálculo das Distâncias entre eixos

dist=pos;

% Cálculo da Linha de Influência

 for i=1:np;                        %Linha de influência teórica
     for j=1:length(dist);
     pt(j,i)=dist(j)+desl*i;
     if pt(j,i)>=0 & pt(j,i)<=L/2;
     H(j,i)=pt(j,i)/2;
     elseif pt(j,i)>L/2 & pt(j,i)<=L;
     H(j,i)=(L-pt(j,i))/2;
     else pt(j,i)<0 | pt(j,i)>L;
     H(j,i)=0;
     end
     end
 end

for i=1:np;                         %Linha de influência numérica
    for j=1:length(dist);
    pt(j,i)=dist(j)+desl*i;
    if pt(j,i)>=0 & pt(j,i)<=L;

H(j,i)=LI(1,1)*(pt(j,i)^15)+LI(2,1)*(pt(j,i)^14)+LI(3,1)*(pt(j,i)^13)+LI(4,1)*(pt(j,i)^12)+LI(5,1)*(pt(j,i)^11)
+LI(6,1)*(pt(j,i)^10)+LI(7,1)*(pt(j,i)^9)+LI(8,1)*(pt(j,i)^8)+LI(9,1)*(pt(j,i)^7)+LI(10,1)*(pt(j,i)^6)+LI(11,1
)*(pt(j,i)^5)+LI(12,1)*(pt(j,i)^4)+LI(13,1)*(pt(j,i)^3)+LI(14,1)*(pt(j,i)^2)+LI(15,1)*(pt(j,i)^1)+LI(16,1)*(pt(
j,i)^0);
    else pt(j,i)<0 | pt(j,i)>L;
    H(j,i)=0;
    end
    end
```

```
end

% Matriz dos Momentos
for j=1:length(dist);
 for i=1:np;
mos(j,i)=H(j,i)*m(i);
moses=sum(mos,2);
 end
end

% Matriz das Linhas de Influências por eixo
for i=1:length(pos);
    for j=1:length(pos);
     for k=1:np;
F1(k)=(H(i,k))*(H(j,k));
     end
      F(i,j)=sum(F1);
    end
end

% Cálculo das Cargas por eixo A
A=pinv(F)*moses;

% Cálculo dos Erros
somaA=sum(A)
somacarga=sum(carga);
errosoma=((somacarga-somaA)/somacarga)*100
pesobrutototal=sum(abs(A))

for q=1:length(A);
    u=1:length(carga);
    erro(q)=(((carga(q)-A(q)')/carga(q))*100);
AA(q)=(erro(q)^2);
end
rms= sqrt(sum(AA)/length(A))


% Plota figuras das cargas por eixo e Erros Relativos
figure;
bar(dist,A,'r');
```

```
title('Cargas por Eixo');
grid on;
xlabel('Comprimento do Veículo (m)');
ylabel('Cargas (kN)');

figure;
bar(dist,abs(erro),'b');
title('Erro Relativo das Cargas');
grid on;
xlabel('Comprimento do Veículo (m)');
ylabel('Erro (%)');

% Salva arquivo com PBT, Erro do PBT e Erro Médio
arquivopesototal=strcat('PBT_',num2str(vel),'_TH_2L4V','.txt');
save (arquivopesototal,'pesobrutototal','errosoma','rms','-ascii','-double');
```