

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

LEONARDO COVATTI DE OLIVEIRA

**Efeitos dinâmicos em ponte férrea diante da variação de velocidade de um
veículo ferroviário – Estudo de caso**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

LEONARDO COVATTI DE OLIVEIRA

**Efeitos dinâmicos em ponte férrea diante da variação de velocidade de um
veículo ferroviário – Estudo de caso**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Martinechen Beghetto

CURITIBA

2016



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Campus Curitiba – Sede Ecoville

Departamento Acadêmico de Construção Civil

Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

Efeitos dinâmicos em ponte férrea diante da variação de velocidade de um veículo ferroviário – Estudo de caso

Por

LEONARDO COVATTI DE OLIVEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 24 de Junho de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Fernando Luiz Martinechen Beghetto, Dr.
UTFPR

Profa. Renata Sá Brito Stramandinoli, Dra.
UTFPR

Prof. Amacin Rodrigues Moreira, MSc.
UTFPR

UTFPR - Deputado Heitor de Alencar Furtado, 4900 - Curitiba - PR Brasil
www.utfpr.edu.br dacoc-ct@utfpr.edu.br telefone DACOC: (041) 3279-4500

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de estar me formando nesta universidade.

Agradeço aos meus familiares e amigos por todo o suporte prestado para poder realizar esse trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Fernando Luiz Martinechen Beghetto por toda a orientação prestada para a realização desse trabalho, assim como a todos os professores do DACOC que de alguma maneira contribuíram para a elaboração desse trabalho.

Agradeço aos engenheiros Matheus Hella e Luiz Henrique Hungria, funcionários da empresa RUMO LOGISTICA, por disponibilizar algumas horas em suas rotinas de trabalho para fornecer e esclarecer algumas dúvidas referentes a ponte e ao veículo ferroviário utilizado neste trabalho.

RESUMO

OLIVEIRA, L. C. de. *Efeitos dinâmicos em ponte férrea diante da variação de velocidade de um veículo ferroviário – Estudo de caso*, 71 f., Trabalho de Conclusão de Curso 2 (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho consiste na análise do comportamento estrutural de uma ponte ferroviária de vão curto submetida a solicitações dinâmicas. A ponte é composta por duas vigas de aço de seção “I” paralelas e bi apoiadas, submetida ao carregamento de uma locomotiva, utilizando-se para isso o modelo de veículo ferroviário e a rotina computacional implementada por Beghetto (2006). As vigas que compõem a estrutura foram subdivididas em vinte elementos finitos de viga Euler-Bernoulli e as irregularidades dos trilhos constituem na fonte de excitação das forças dinâmicas, que foram assimiladas a uma função harmônica. O problema foi analisado para uma faixa de velocidade do veículo ferroviário de 20 a 100km/h. Após isso, compararam-se os resultados encontrados na análise dinâmica com os valores das análises estática e pseudo-estática majorada pelo coeficiente de impacto dinâmico da NBR 7187 (ABNT, 2003). Nessa comparação, verificou-se que os valores encontrados para a análise dinâmica não superaram os valores das análises estática e pseudo-estática quando o veículo transita sobre a ponte em velocidades próximas à condição ressonante. Este fato ocorre devido a inércia das massas das rodas da locomotiva.

Palavras-chave: Ponte ferroviária, Dinâmica Estrutural, Elementos Finitos.

ABSTRACT

OLIVEIRA, L. C. de. *Dynamic effects on railway bridge on the speed variation of a railway vehicle - Case Study*, 71 f., Completion of course work 2 (Bachelor of Civil Engineering.) - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2016.

This work is the analysis of the structural behavior of a short railway bridge subjected to dynamic loads. The bridge is composed of two "I" section steel beams parallel and Bi supported, subjected to the load of a locomotive, using for this the railway vehicle model and computational routine implemented by Beghetto (2006). The beams that make up the structure were subdivided into twenty *Euler-Bernoulli* finite element beam and irregularities of the tracks are the excitation source of the dynamic forces, which were treated as a harmonic function. The problem was analyzed for a speed range of railway vehicle 20 to 100km / h. After this, we compared the results found in the dynamic analysis with the values of the static analysis and pseudo-static increased by dynamic impact coefficient of the NBR 7187 (ABNT, 2003). In this comparison, it was found that the values found for the dynamic analysis did not exceed the values of the pseudo-static analysis and static when the vehicle moves over the bridge at speeds resonant condition. This occurs because the mass inertia of the locomotive wheels.

Keywords: Railway Bridge, Structural Dynamics, Finite Element.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz do transporte de cargas milhões (TKU).	12
Figura 2: Competitividade comparada entre vagão e caminhão.....	13
Figura 3: Coeficiente de impacto x vão para pontes de concreto armado.....	15
Figura 4: Disposição dos sistemas mola-amortecedor Fonte: Beghetto (2006).....	19
Figura 5: Fluxograma de passagem de energia entre os componentes do veículo ferroviário .	20
Figura 6: Graus de liberdade do modelo de veículo ferroviário.....	20
Figura 7: Deslocamentos das suspensões	21
Figura 8: Irregularidades verticais da via	23
Figura 9: Pontos de contato entre roda e trilho.....	24
Figura 10: Distribuição de tensões em uma seção de viga de Euler-Bernoulli	26
Figura 11: Funções interpoladoras de <i>Hermite</i>	28
Figura 12: Ponte Ferroviária localizada no km 126+900 da ferrovia do Xisto.	32
Figura 13: Vista espacial do modelo de ponte ferroviária.....	33
Figura 14: Ponte modelada por elementos finitos	34
Figura 15: Locomotiva modelo G22U, com rodagem B-B.....	36
Figura 16: Vagão HFE 090839-9 HOPPER FECHADO da empresa Cargill.....	37
Figura 17: Viga simplesmente apoiada solicitada por duas cargas concentradas	39
Figura 18: Coeficiente de impacto x vão para pontes ferroviárias de vãos iguais	40
Figura 19: Vista Lateral Ponte Ferroviária do km 126+900.....	41
Figura 20: Vista Inferior da Ponte Ferroviária do km 126+900	42
Figura 21: Apoio das Vigas de Aço da Ponte Ferroviária do km 126+900	42
Figura 22: Detalhamento Longitudinal da Ponte Ferroviária do km 126+900	43
Figura 23: Simetria longitudinal da superestrutura	46
Figura 24: Representação do caso mais desfavorável de solicitação - Caso A.....	47
Figura 25: Deslocamento no centro do vão da viga I – Análise estática.....	47
Figura 26: Veículo ferroviário transferindo seu carregamento para ponte - Caso B.....	48
Figura 27: Veículo ferroviário transferindo seu carregamento para a ponte - Caso C.....	49
Figura 28: Gráfico dos deslocamentos do centro do vão da viga I - Casos A, B e C.....	49
Figura 29: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 20 km/h	50
Figura 30: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 38 km/h	50
Figura 31: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 39 km/h	51
Figura 32: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 44 km/h.	52

Figura 33: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 50 km/h	53
Figura 34: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 100 km/h	53
Figura 35: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte X velocidades	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades de massa dos componentes do veículo.	37
Tabela 2: Propriedades dinâmicas dos sistemas de suspensão	38
Tabela 3: Distâncias Geométricas	38
Tabela 4: Dimensões e propriedades do perfil metálico I	44
Tabela 5: Dimensões e propriedades do perfil do trilho.....	45
Tabela 6: Propriedades utilizadas no modelo de elementos finitos.....	46
Tabela 7: Velocidades ressonantes para a ponte	52
Tabela 8: Deslocamentos máximos no centro da viga	55

LISTA DE EQUAÇÕES

Equações 1: Equações dos deslocamentos das suspensões primárias e secundárias.....	22
Equações 2 – Equações de irregularidades em cada roda	23
Equações 3: Forças aplicadas pelo veículo na ponte.....	25
Equação 4: Equação de energia de deformação a flexão.....	26
Equação 5 – Equação polinomial cúbica e suas condições de contorno.	27
Equações 6 – Equações de <i>Hermite</i> e suas condições de contorno.	27
Equação 7: Matriz de rigidez do elemento finito de viga.....	28
Equação 8: Equação de movimento do elemento finito de viga em formato matricial.....	28
Equação 9: Vetores de aceleração e de deslocamento.....	29
Equações 10: Representação matricial de elementos finitos	29
Equação 11: Equação de movimento do Sistema.....	29
Equação 12: Matriz de amortecimento	30
Equação 13: Equação matricial de movimento do sistema incluindo o amortecimento	30
Equação 14: Distribuição dos esforços do veículo sobre os elementos finitos da viga através das rodas	31
Equação 15: Inércia da seção transversal equivalente (Teorema de <i>Steiner</i>).....	33
Equação 16: Equação do deslocamento máximo no centro da viga para 2 cargas concentradas	39
Equação 17: Coeficiente de impacto para obras ferroviárias	40
Equação 18: Frequência amortecida de vibração	45
Equação 19: Velocidade ressonante do veículo na ponte.....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVO.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1	MODELO DE VEÍCULO FERROVIÁRIO.....	19
3.1.1	Deslocamentos da Suspensão.....	19
3.1.2	Irregularidades da Via.....	22
3.1.3	Esforços Aplicados à Estrutura da Ponte.....	24
3.2	MODELO DE PONTE.....	26
3.2.1	Distribuição dos Esforços do Veículo.....	31
3.2.2	Modelo de Ponte Ferroviária.....	32
4	METODOLOGIA.....	35
4.1	RECURSOS DE <i>SOFTWARE</i>	35
4.2	RECURSOS DE <i>HARDWARE</i>	35
4.3	DADOS NECESSÁRIOS.....	36
4.3.1	Veículo Ferroviário Modelado.....	36
4.3.2	Análise Estática da Ponte.....	39
4.3.3	Análise Pseudo-Estática da Ponte.....	40
4.3.4	Análise Dinâmica da Ponte.....	41
5	RESULTADOS.....	47
5.1	ANÁLISE ESTÁTICA.....	47
5.2	ANÁLISE PSEUDO-ESTÁTICA.....	48
5.3	ANÁLISE DINÂMICA.....	48
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	55
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
6.1	CONCLUSÃO.....	56
6.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
	ANEXOS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, segundo dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2015), a primeira locomotiva inventada foi em 1814 pelo engenheiro inglês *George Stephenson* devido à necessidade da época vivida pela revolução industrial que proporcionou um aumento do volume de produção de mercadorias e a necessidade de transportá-las com rapidez, para os mercados consumidores. Em 1825, *Stephenson* realizou o primeiro transporte ferroviário entre duas cidades, *Stockton* e *Darlington*, distanciadas em 15 quilômetros a uma velocidade de aproximadamente 20 quilômetros horários. No início da segunda metade do século XIX, pelo menos 3mil quilômetros de via férrea estendia-se pela Europa e 5mil nos Estados Unidos da América.

Com a vinda da família real para o Brasil em 1808, os incentivos do governo imperial fomentaram a construção de modais de transportes. Em 1828, com a Carta de Lei, o Governo Imperial autorizou a construção e exploração de estradas em geral no país, o que ajudaria não apenas no desenvolvimento econômico, mas também na interligação das diversas regiões.

A primeira ferrovia do Brasil começou a ser construída em 1852, pelo empreendedor brasileiro Irineu Evangelista de Souza, também conhecido como o Barão de Mauá, que interligava o Porto da Estrela até Raiz da Serra, em direção à cidade de Petrópolis. “Em 1854, a primeira seção, de 14,5 km e bitola (distância entre trilhos) de 1,68m, foi inaugurada por D. Pedro II, no dia 30 de Abril. A estação de onde partiu a composição inaugural receberia mais tarde o nome de Barão de Mauá.” (DNIT, 2015). Esta estrada de ferro possibilitou a intermodalidade dos transportes aquaviário e ferroviário, assim surgindo a primeira operação intermodal do Brasil. É importante lembrar que antes da existência do modal sobre trilhos, o transporte de mercadorias, cerca de 100 mil sacas de café, era realizado por animais em estradas carroçáveis. Este novo modal conseguiu substituir grande parte das 200 mil bestas que faziam o transporte dessa especiaria e outros produtos agrícolas (Idem, 2015).

Atualmente o mundo e o Brasil passam por um momento econômico frágil. Com a crise econômica assolando os países, estudiosos enfatizam a importância do investimento em infraestrutura. O estudioso Carvalho (2015), do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), afirma que a crise internacional reforça a necessidade de que o Brasil tenha um plano de investimento público em infraestrutura e transportes e que com isso todos os setores econômicos se fortaleceram. Porém, quando comparado o Brasil com os países desenvolvidos nota-se que ainda falta muito para chegar ao grau de investimentos realizados

no exterior. “O estoque de investimento em infraestrutura no Brasil é de ordem de 50% do Produto Interno Bruto (PIB) enquanto a média das principais economias do mundo é de 70%. Na China, esse indicador é de 76% e no Japão, de 179%” relata Braga (2014). Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2015) o transporte é uma das principais funções logísticas em um país e representa a maior parcela dos custos logísticos na maioria das organizações, tanto pública quanto privada, e em média, representa 60% das despesas logísticas. Assim, o objetivo de um estudo de logística é, o transporte do maior número de mercadorias com o mínimo custo e menor tempo possível.

No Brasil, os modais de transporte de mercadorias explorados são o rodoviário, ferroviário, aquaviário, dutoviário e aéreo, cuja matriz de transporte de cargas por quilometro útil (TKU) total, ou seja, transporte levando em consideração apenas o volume da mercadoria transportada, é de 61,1%, 20,7%, 13,6%, 4,2% e 0,4%, respectivamente, como ilustra a Figura 1.

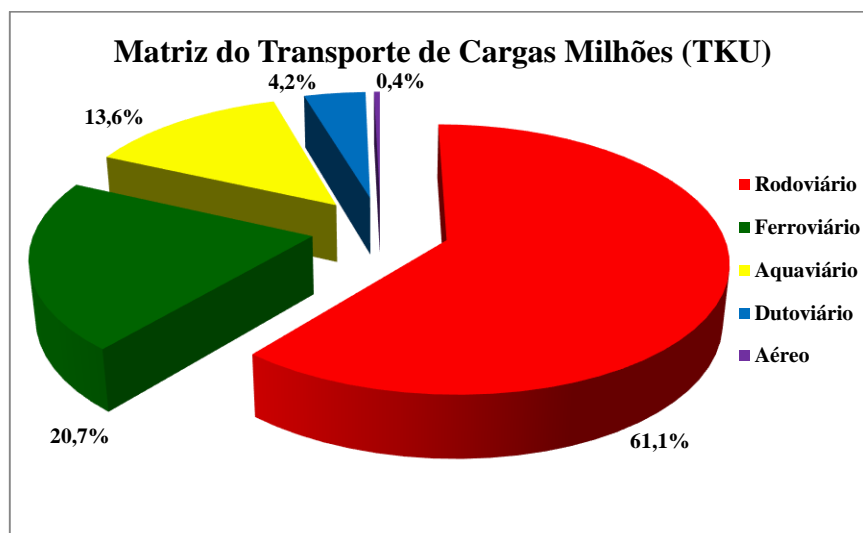


Figura 1: Matriz do transporte de cargas milhões (TKU).
Fonte: CNT (fevereiro, 2015)

Como se pode observar as malhas mais exploradas dentre os modais são o rodoviário e o ferroviário. Com a malha rodoviária sendo aproximadamente 57 vezes maior que a ferroviária, se espera que o foco de investimento se torne cada vez mais o modal ferroviário, visto que “o custo do frete, cobrado pelas operadoras nas ferrovias, é 50% mais barato em relação ao transporte rodoviário.” (DNIT, 2015). Em comparação de cargas transportadas, segundo a Log-in Logística Intermodal (2015), entre os dois modais, enquanto um vagão graneleiro convencional tem uma capacidade de transporte de 100 toneladas, um caminhão que tenha a mesma função de transporte tem apenas 28 toneladas, cerca de 3,57 vezes mais capacidade, como mostra a Figura 2; e comparando em relação ao combustível necessário para

transportar 1 tonelada por 1000 quilômetros, a autonomia ferroviária é de 6 litros enquanto na rodoviária é de 15L (CNT, 2015). Segundo o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT, 2015) em 2005 a ordem de investimento no setor de transportes foi de 58% no setor rodoviário, e de apenas 25% no ferroviário. Para o ano de 2025 o planejamento de investimento é de 30% e 35% para rodovias e ferrovias, respectivamente.

Competitividade comparada

Vagão graneleiro (100 toneladas de carga)



Um trem composto de 100 vagões, com as medidas acima, substitui 357 caminhões.

Fonte: Log-In Logística Intermodal

Caminhão graneleiro (28 toneladas de carga)



3,57 caminhões (aprox. 100 toneladas de carga)



Figura 2: Competitividade comparada entre vagão e caminhão

Fonte: Log-In Logística Intermodal

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento dinâmico da estrutura de uma ponte ferroviária conhecida devido à variação de velocidade de uma locomotiva interagindo com imperfeições e irregularidades em uma via férrea. Deste modo, pretende-se:

- Encontrar as velocidades críticas que ocasionam acelerações/vibrações que possam causar ressonância na ponte ferroviária.
- Encontrar o deslocamento estático máximo do centro da viga da ponte.
- Encontrar o deslocamento dinâmico máximo do centro da viga da ponte.
- Comparar as análises estáticas, pseudo-estática e dinâmica, em relação ao coeficiente de impacto.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o aumento do investimento no modal ferroviário no Brasil, existirá uma expansão em sua malha ferroviária e capacidade logística exigindo novos profissionais capacitados para executar e gerenciar esta nova era dos transportes. Com isso, se justifica a importância de novos estudos na área, como é a intenção deste trabalho.

Outro motivo é que uma parcela dos engenheiros civis tem dificuldade para analisar estruturas, principalmente quando submetidas a carregamentos dinâmicos, assim reafirmando a importância de estudos e trabalhos nesta área pouco explorada durante a formação acadêmica deste profissional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Michaltsos (2000) levou em consideração as irregularidades de uma via, quando um trem se desloca de um ponto A para um ponto B. Essas imperfeições interagindo com o sistema do veículo provocam reações, os quais são transmitidas para os elementos estruturais da obra de arte. Foi realizado em seu trabalho uma análise de como as imperfeições de uma ponte, assim como o comprimento de seu vão, podem interagir na origem de esforços transmitidos pela passagem de um trem a sua estrutura. Os resultados obtidos foram que quanto maior for o vão entre os apoios da ponte, menor será o impacto derivado do veículo. Portanto, quando o comprimento do vão da ponte for longo, poderá se desconsiderar o trabalho da suspensão do material rodante. Em contra partida, o inverso é verdadeiro; quanto menor o vão entre os pilares/apoios de sustentação da estrutura, maior será o impacto causado pelo trem, então deverá considerar-se a suspensão do veículo.

Albuquerque e Kramar (2015) abordaram a questão sobre o coeficiente de impacto presente na norma brasileira que versa sobre o projeto de pontes de concreto armado e protendido, NBR 7187 (ABNT, 2003). Esse coeficiente permite assimilar as cargas móveis a cargas estáticas, sendo que este depende exclusivamente do comprimento do vão teórico do elemento solicitado. A partir deste coeficiente, é possível notar graficamente que quanto menor o vão teórico da ponte, maior será o coeficiente de impacto dinâmico a ser aplicado na estrutura, como ilustra a Figura 3 a seguir:

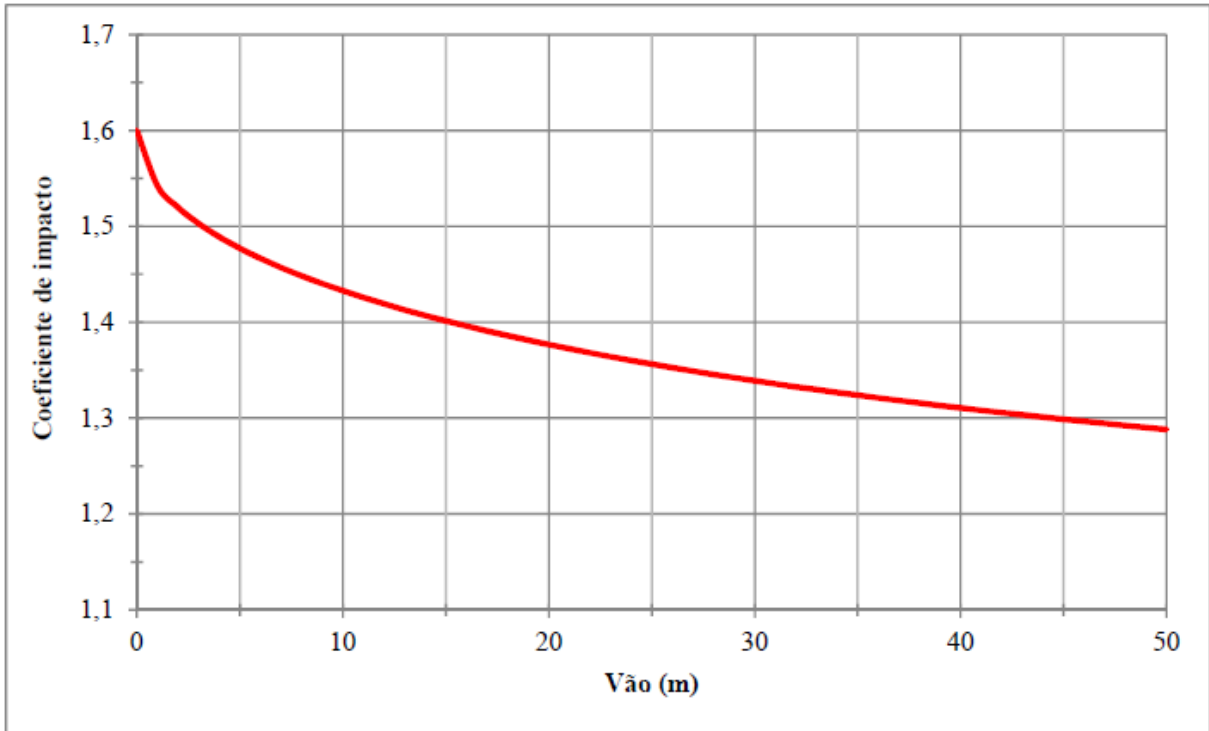


Figura 3: Coeficiente de impacto x vão para pontes de concreto armado

Fonte: Albuquerque e Kramar (2015)

Fryba (2001) também levou em consideração o comprimento do vão de pontes. Em seu estudo constatou que quando um trem de alta velocidade passa por pontes de vãos curtos que apresentam irregularidades, quanto menor for o vão entre os apoios da superestrutura maior será a chance do fenômeno de ressonância acontecer. Para a elaboração dos cálculos que levou a esta conclusão, o veículo de alta velocidade foi modelado como sendo uma série de cargas concentradas intervaladas entre si com a mesma distância e variou a velocidade do veículo para achar a velocidade crítica da ponte, ou seja, a velocidade que causaria o fenômeno similar ao da vibração da ressonância. Ao final de seus estudos, observou-se que com velocidades acima de 200 km/h o fenômeno se intensifica. Outro fator importante é que a amplitude das vibrações ressonantes são inversamente proporcionais ao comprimento da ponte e diretamente proporcionais ao quadrado da velocidade.

Yang et al. (1997) realizaram estudos sobre vibrações originadas devido à passagem de trens de alta velocidade por uma ponte representada por vigas retas simplesmente apoiadas, onde a análise dos trens se traduziram em uma série de cargas concentradas com espaçamentos iguais e movendo-se com uma velocidade constante. Desta forma, foi representado os deslocamentos da viga da ponte, sendo esses deslocamentos encontrados devido à variação da velocidade e do comprimento do vão da superestrutura. Notou-se que as deformações eram similares a funções harmônicas. A ponte ferroviária foi modelada através de elementos finitos

sendo representada como uma viga homogênea e com características constantes. Na análise do amortecimento das respostas dinâmicas e para integrar o sistema, foram utilizados os métodos de *Rayleigh* e de *Newmark*, respectivamente. O resultado deste trabalho demonstrou que:

- Quanto menor o vão entre os apoios, maior será o impacto ocasionado pela passagem do trem (cargas concentradas).

Sophianopoulos et al. (1999) também realizaram estudos sobre vibrações, os quais conseguiram elaborar uma formulação para os efeitos vibratórios assim como se encontrou soluções para elas. Em seus estudos, a ponte com vigas simplesmente apoiadas e com rigidez constante a qual o trem transmitia seus esforços, foi modelada similarmente ao estudo de Yang et al. (1997), porém consideraram a seção transversal da mesma simétrica. Nessa estrutura, o veículo foi dimensionado com maior complexidade sendo subdividido em três partes: massa não suspensa (rodas), suspensão de amortecimento com rigidez elástica (truque) e massa suspensa (vagão). Uma ressalva importante foi a consideração de que a massa do veículo possuía uma excentricidade em relação à via longitudinal. Os pesquisadores com suas simulações computacionais puderam analisar:

- Combinações entre as vibrações torcionais, devido à excentricidade da massa do trem, em relação ao centro geométrico das vigas da ponte;
- Deslocamentos, que foram representados por séries harmônicas.

Delgado et al. (1997) levaram em consideração um sistema mais complexo de representação do veículo a fim de analisar os efeitos dinâmicos entre veículo e ponte. Foi reproduzido em seus estudos várias simulações que consideram ou não o amortecimento da suspensão de um trem. O sistema da ponte foi modelado em elementos finitos como um vão único e o veículo sendo composto por massa e mola. Após analisar as solicitações transmitidas pelo trem, que foi representado nos cálculos de quatro formas diferentes: estático, dinâmico sem interação, dinâmico com interação e dinâmico com interação e amortecimento, para estrutura, os resultados foram os seguintes:

- No sistema mais complexo, o que envolve a representação do veículo com o sistema de amortecimento, observou-se que a transmissão dos esforços para a via é diretamente proporcional à rigidez do sistema, ou seja, quanto maior for a rigidez do sistema maior será o esforço transmitido;
- O sistema com amortecimento contribuiu para a redução das amplitudes dos deslocamentos, assim amenizando as vibrações;

- Quando comparado o sistema com interação e sem interação, notou-se que o primeiro obteve um deslocamento maior que o segundo. Isso acontece devido ao deslocamento da massa móvel, que contribui para o acréscimo do período de vibração da estrutura;
- O modelo estático foi o sistema que obteve as menores respostas quando comparado com as demais solicitações, pois não se considerou o peso próprio da viga.

Law et al. (2004) identificaram as cargas que atuam nos eixos de um veículo utilizando elementos finitos. Em sua formulação, o trem foi modelado tendo 4 graus de liberdade, e com o método de *Lagrange* as equações de movimento foram formuladas. A ponte é modelada como uma viga reta e homogênea e sua rigidez e massa são encontrados através de funções de interpolação cúbica de *Hermite*. O amortecimento é encontrado e calculado através do método de *Rayleigh*. Para encontrar as deformações das estruturas, foi utilizado o instrumento *strain gauge*. Para minimizar os erros encontrados das leituras efetuadas, fizeram uso do método dos mínimos quadrados. Com a teoria da elasticidade e com as deformações é possível encontrar os deslocamentos. Por fim, com os carregamentos nodais e os deslocamentos se obtém as cargas do eixo do veículo.

Correa (2003), em sua dissertação de mestrado, aborda o tema de “Vibrações em pontes ferroviárias” produzidas por trens eletrificados no Brasil. Ele realizou vários experimentos de modelagem da representação do trem se movendo na via. Foi representado desde cargas concentradas até considerando um sistema com múltiplos graus de liberdade. No modelo da via, a superestrutura foi modelada como um pórtico e os dormentes foram modelados como um sistema massa-mola. Em comparação com os resultados obtidos, o modelo de veículo que mais foi fiel à realidade foi o representado por 6 graus de liberdade.

Song et al. (2003) modelam o sistema da superestrutura ferroviária utilizando elementos finitos; plataforma da ponte utilizando *NFS (nonconforming flat shell)*, o lastro por molas elásticas e trilhos/dormentes por elementos finitos de viga. O modelo do sistema de material rodante (locomotiva e vagões) são representados com 38 graus de liberdade e com a formulação *Lagrangeana* obtêm-se as equações de movimento. As irregularidades que excitam o veículo são imperfeições verticais e laterais. O amortecimento foi calculado através do método de *Rayleigh*. Com um sistema de equações diferenciais formado, utiliza-se o método *Newmark* para integrá-las. Com as equações integradas em mãos, foi aferido que os resultados possuíam grande veracidade perante as deflexões no meio da ponte obtido através de experimentos.

Beghetto (2006) estudou através de análises numéricas em modelos tridimensionais o comportamento dinâmico de um veículo ferroviário e uma ponte férrea. A modelagem do veículo com 9 graus de liberdade foi feita através da associação de corpos rígidos conectados

em sistemas de suspensão. Para se obter as equações de movimento do veículo foi utilizado o princípio de *D'Alembert*, da segunda Lei de *Newton* e do equilíbrio de forças e de momentos.

A estrutura da ponte foi modelada em elementos finitos de viga de *Euler-Bernoulli* com seção transversal constante, sendo duas vigas I de aço, paralelas, simétricas e bi-apoiadas. O método de *Rayleigh* foi utilizado para definir o amortecimento da estrutura. Pelo método de *Newmark* se fez a integração numérica das equações de movimento da ponte e do veículo. As forças que são determinadas nos pontos de contato do veículo com o trilho, que leva em consideração a massa do vagão, massa do truque, massa da roda e esforços inerciais, são aplicadas à estrutura da ponte. Obteve-se que os máximos deslocamentos do veículo em situações de baixa velocidade e máximas amplitudes de irregularidade da via e que a suspensão secundária reduziu os deslocamentos e acelerações dos graus de liberdade do vagão. Na análise dinâmica da ponte, os máximos deslocamentos ocorreram próximos à velocidades de 30 km/h e 80km/h, onde ocorre o fenômeno de ressonância. Foi observado também que próximos à ressonância constatou-se a ocorrência do batimento, superposição de ondas de mesma amplitude, direção e frequências próximas. De acordo com os modelos desenvolvidos, as velocidades que são favoráveis ao tráfego estão localizadas entre 35 km/h e 50 km/h.

Assunção (2014) analisou esforços dinâmicos em estruturas industriais. Constatou que uma das principais fontes de excitação que ocorre em ambientes industriais são representadas por função harmônica. Durante a sua investigação, foi observado que para estruturas que suportam grandes equipamentos não é recomendável adotar simplificações nos modelos estruturais para a análise de deslocamentos e esforços.

Ribeiro et al. (2013), conforme citado por Albuquerque e Kramar (2015, p. 23), desenvolveram um modelo numérico tridimensional de ponte, incluindo a via férrea e o comboio, para validar experimentalmente um modelo numérico de interação de trem-estrutura na ponte ferroviária.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A metodologia a ser aplicada neste trabalho é um estudo de caso baseado no estudo que Beghetto (2006) utilizou em sua dissertação de mestrado sobre os efeitos dinâmicos em modelo de veículo e ponte ferroviário diante da variação de velocidade e irregularidades verticais da via.

3.1 MODELO DE VEÍCULO FERROVIÁRIO

A seguir será apresentada a formulação do modelo de deslocamentos da suspensão, irregularidades da via, forças e equações de movimento e esforços aplicados na ponte.

3.1.1 Deslocamentos da Suspensão

O veículo ferroviário é representado por Beghetto (2006) através da associação de corpos rígidos interconectados a um sistema de suspensão. O modelo é composto por um vagão, dois truques sendo um dianteiro e outro traseiro, duas suspensões sendo uma primária e outra secundária e um conjunto de rodas, totalizando 8 unidades.

Na Figura 4, é representado o sistema de suspensão do veículo. Analisando a suspensão primária, que faz a ligação entre as rodas e o truque do veículo, o fator “K” representa o coeficiente de rigidez elástico linear, das molas translacionais, e o fator “C” está relacionado ao amortecimento viscoso linear, sistema que absorve os esforços através de cunhas de fricção. Analogamente, a suspensão secundária, a qual faz a ligação entre o truque e vagão propriamente dito, segue o mesmo padrão.

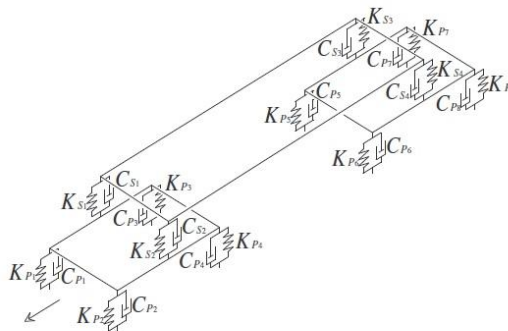


Figura 4: Disposição dos sistemas mola-amortecedor

Fonte: Beghetto (2006)

Ao transitar pela via permanente, seguindo em velocidade constante, o veículo fica sujeito às irregularidades da via que provocam excitações ao conjunto massa-mola-amortecedor citado anteriormente. Essas excitações são representadas como impactos e vibrações. A transmissão desses efeitos segue o fluxo representado na Figura 5 abaixo:

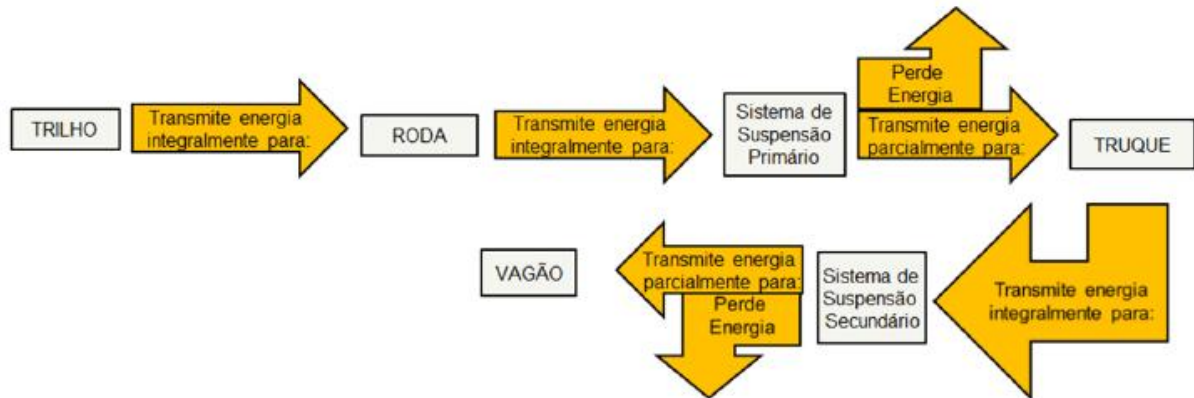


Figura 5: Fluxograma de passagem de energia entre os componentes do veículo ferroviário

Fonte: Albuquerque e Kramar (2015)

Como as rodas e os truques são considerados corpos rígidos, os esforços são transmitidos integralmente para as suspensões primárias e secundárias. Essas suspensões absorvem uma parte dos efeitos e os transmitem a outros corpos rígidos.

Na Figura 6 são representados os graus de liberdade considerados no veículo, desprezando os efeitos da temperatura e do atrito entre trilho e roda.

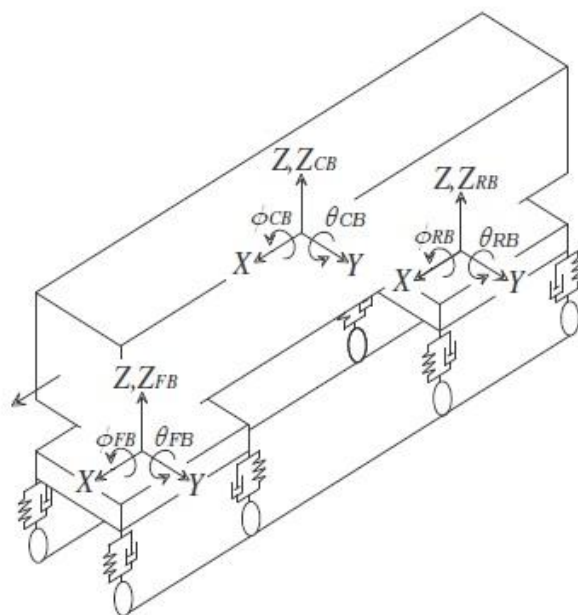


Figura 6: Graus de liberdade do modelo de veículo ferroviário

Fonte: Beghetto (2006)

Como já mencionado, as irregularidades da via causam deslocamentos no veículo, e esses deslocamentos são determinados por contribuições dos graus de liberdade do veículo. Em sua dissertação, é dado o exemplo de como se determinar as equações dos deslocamentos das suspensões em relação ao tempo. Antes de iniciar o raciocínio utilizado, é de utilidade saber que os pontos de apoios do vagão sobre os trilhos foram enumerados de 1 à 8, em uma vista frontal do veículo, as rodas do lado esquerdo são representadas como sendo ímpares (1, 3, 5, e 7) e as do lado direito as pares (2, 4, 6, 8) e o truque frontal serve como referência para o início da contagem. Posto isso, a linha de raciocínio proposta por Beghetto (2006) é que: “a equação dos deslocamentos pertencentes à suspensão primária (δP_i), Figura 7, é obtida pela contribuição da translação do truque dianteiro ao longo do eixo (Z) mais a contribuição da rotação do truque dianteiro em torno do eixo (X)”, associada à metade da distância transversal entre as rodas do veículo, nomeado como “ c ”, “mais a contribuição da rotação do truque dianteiro em torno do eixo (Y) associado à distância b ”, onde b é representada pela metade da distância longitudinal entre as rodas de um determinado truque, “mais a contribuição da irregularidade da via analisada nesta roda ($I_{R_i}(t)$), tudo isso em função do tempo”.

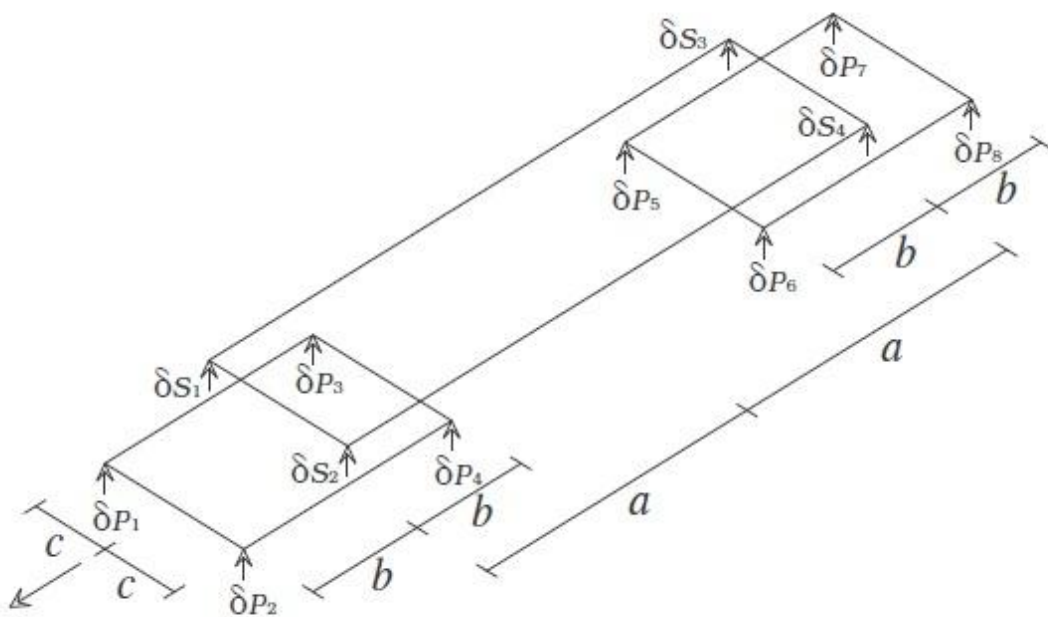


Figura 7: Deslocamentos das suspensões
Fonte: Beghetto (2006)

Para se calcular os deslocamentos da suspensão secundária, o raciocínio é análogo ao anterior. O exemplo utilizado na dissertação em 2006 é o seguinte:

- i) a equação dos deslocamentos da suspensão secundária (δS_i), é obtida pela contribuição da translação do vagão ao longo do eixo (Z);
- ii) mais contribuição da rotação do vagão em torno do eixo (X) associada à distância (c);
- iii) mais a contribuição da rotação do vagão em torno do eixo (Y) associada à distância entre os eixos dos truques (a);
- iv) mais a contribuição da translação do truque dianteiro ao longo do eixo (Z);
- v) mais a contribuição da rotação do truque dianteiro em torno do eixo (X) associada à distância (c).

Em suma, as funções dos deslocamentos das suspensões podem ser escritas da seguinte maneira:

$$\delta_{Pi}(t) = Z_{FB}(t) + (-1)^i c \phi_{FB}(t) - b \theta_{FB}(t) - I_{Ri}(t) \quad \text{para } i = 1,2$$

$$\delta_{Pi}(t) = Z_{FB}(t) + (-1)^i c \phi_{FB}(t) + b \theta_{FB}(t) - I_{Ri}(t) \quad \text{para } i = 3,4$$

$$\delta_{Pi}(t) = Z_{RB}(t) + (-1)^i c \phi_{RB}(t) + b \theta_{RB}(t) - I_{Ri}(t) \quad \text{para } i = 5,6$$

$$\delta_{Pi}(t) = Z_{RB}(t) + (-1)^i c \phi_{RB}(t) + b \theta_{RB}(t) - I_{Ri}(t) \quad \text{para } i = 7,8$$

$$\delta_{Si}(t) = Z_{CB}(t) + (-1)^i c \phi_{CB}(t) + a \theta_{CB}(t) - Z_{FB}(t) + (-1)^{i+1} c \phi_{FB}(t) \quad \text{para } i = 1,2$$

$$\delta_{Si}(t) = Z_{CB}(t) + (-1)^i c \phi_{CB}(t) + a \theta_{CB}(t) - Z_{RB}(t) + (-1)^{i+1} c \phi_{RB}(t) \quad \text{para } i = 3,4$$

Equações 1: Equações dos deslocamentos das suspensões primárias e secundárias

Fonte: Beghetto (2006)

Salientando que as funções $\phi(t)$ e $\theta(t)$ representam as rotações em torno dos eixos X e Y, respectivamente.

3.1.2 Irregularidades da Via

Ao se deslocar sobre a ponte, o veículo expõe suas rodas às excitações provenientes das irregularidades dos trilhos. Pode-se ver na Figura 8 a seguir, de forma exagerada, que as irregularidades verticais da via são similares a funções harmônicas. Assim sendo, a modelagem da via será realizada através de funções senoidais.

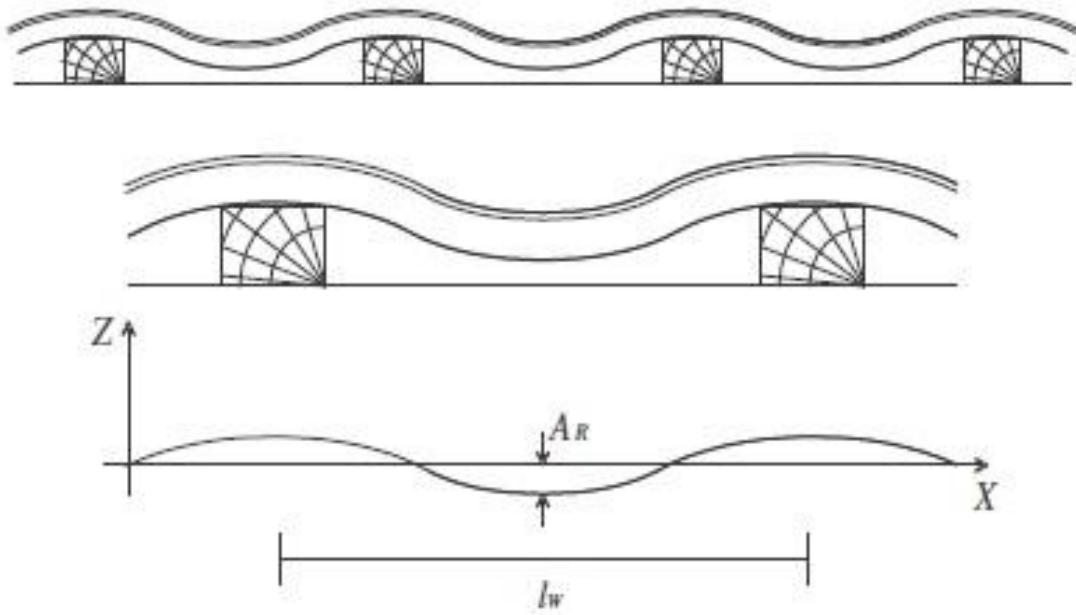


Figura 8: Irregularidades verticais da via
Fonte: Beghetto (2006)

Para se encontrar as equações harmônicas das irregularidades verticais da via, deve-se considerar, ao longo do tempo, a posição a qual as rodas do veículo se encontram. Também deve-se considerar que as rodas são indeformáveis e atuam como corpos rígidos. Nota-se que A_R é a amplitude da onda senoidal e l_w o comprimento da mesma. As equações que representam as funções de irregularidade são as seguintes:

$$I_{R_{2i-1}}(t) = A_{RO} \sin \left[\frac{2\pi v}{l_w} \left(t + \frac{|P_{W_{2i-1}} - P_{W_1}|}{v} \right) \right] \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, 4$$

$$I_{R_{2i}}(t) = A_{RE} \sin \left[\frac{2\pi v}{l_w} \left(t + \frac{|P_{W_{2i}} - P_{W_2}|}{v} \right) \right] \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, 4$$

Equações 2 – Equações de irregularidades em cada roda
Fonte: Beghetto (2006)

Onde se podem distinguir as variáveis como sendo:

$I_{R_{2i-1}}(t)$ = Irregularidade nas rodas ímpares em função do tempo;

$I_{R_{2i}}(t)$ = Irregularidade nas rodas pares em função do tempo.

A_{RO} = amplitude de onda senoidal das rodas ímpares;

A_{RE} = amplitude da onda senoidal das rodas pares;

v = velocidade do veículo;

l_w = comprimento de onda senoidal;

t = tempo;

P_{Wi} = coordenada dos pontos de contato entre rodas e trilho.

As coordenadas dos pontos de contato entre rodas e trilho (P_{Wi}) são representados conforme a Figura 9:

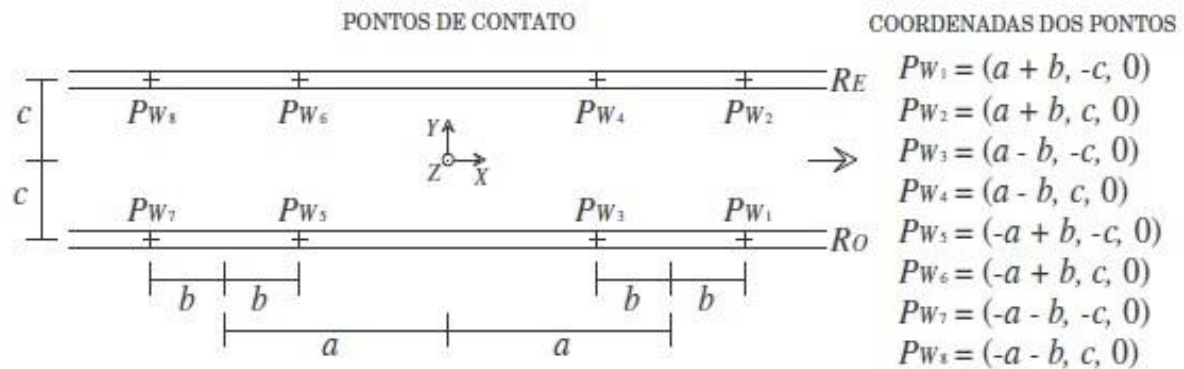


Figura 9: Pontos de contato entre roda e trilho
Fonte: Beghetto (2006)

3.1.3 Esforços Aplicados à Estrutura da Ponte

Beghetto (2006) exemplifica a transmissão dos esforços do veículo para a via analisando a interação entre a roda número um do vagão, onde a mesma entra em contato com o trilho (P_{w1}). Em sua argumentação, ele considera que essa contribuição é referente ao somatório de:

- i. 1/8 da massa do vagão;
- ii. 1/4 da massa do truque;
- iii. Massa da roda.

Também deve-se considerar os esforços de inércia da roda 1. Assim esses esforços “são formados pela contribuição das massas da roda um associada à irregularidades, mais a contribuição dos esforços provenientes da suspensão primária associada à esta roda”. Posto isto, se pode escrever as equações da seguinte maneira:

$$F_{R_{2i-1}}(t) = \left[-\left(\frac{m_{CB}}{8} + \frac{m_{FB}}{4} + m_{W_{2i-1}} \right) g + m_{W_{2i-1}} \ddot{R}_{2i-i}(t) - F_{P_{2i-i}}(t) \right] \quad \text{para } i = 1,2$$

$$F_{R_{2i}}(t) = \left[-\left(\frac{m_{CB}}{8} + \frac{m_{FB}}{4} + m_{W_{2i}} \right) g + m_{W_{2i}} \ddot{R}_{2i}(t) - F_{P_{2i}}(t) \right] \quad \text{para } i = 1,2$$

$$F_{R_{2i-1}}(t) = \left[-\left(\frac{m_{CB}}{8} + \frac{m_{RB}}{4} + m_{W_{2i-1}} \right) g + m_{W_{2i-1}} \ddot{R}_{2i-i}(t) - F_{P_{2i-i}}(t) \right] \quad \text{para } i = 3,4$$

$$F_{R_{2i}}(t) = \left[-\left(\frac{m_{CB}}{8} + \frac{m_{RB}}{4} + m_{W_{2i}} \right) g + m_{W_{2i}} \ddot{R}_{2i}(t) - F_{P_{2i}}(t) \right] \quad \text{para } i = 3,4$$

Equações 3: Forças aplicadas pelo veículo na ponte.
Fonte: Beghetto (2006)

Nestas equações pode descrever-se que cada variável significa:

$F_{R_i}(t) = -N_{R_i}(t)$ = forças aplicadas pelo veículo na ponte;

m_{CB} = massa do vagão;

m_{FB} = massa do truque dianteiro;

m_{RB} = massa do truque traseiro;

m_{W_i} = massa da roda;

$\ddot{R}_i(t)$ = aceleração devido as irregularidades em função do tempo;

$F_{P_i}(t)$ = forças na suspensão primária.

Enquanto as forças normais ($N_{R_i}(t)$) derem um resultado positivo, isso quer dizer que as rodas se encontram em contato com o trilho.

3.2 MODELO DE PONTE

Craig (1981), conforme citado por Beghetto (2006, p. 32) expõem a teoria da viga de *Euler-Bernoulli*, teoria clássica de viga, para fazer os cálculos dos esforços no modelo de ponte. As hipóteses a serem feitas sobre a teoria são:

- A existência da linha neutra (eixo x), onde a viga não sofre tração nem compressão;
- Seções planas e perpendiculares à linha neutra permanecem planas e perpendiculares após a deformação, ou seja, as deformações devidas ao cisalhamento são negligenciadas;
- Material elástico linear e homogêneo;
- As tensões (σ_z) e (σ_y) são desprezíveis comparadas à tensão axial (σ_x);
- O plano (xy) é um plano principal.

Na Figura 10, observa-se a linha neutra e a distribuição de tensões de compressão e de tração em uma seção de uma viga de *Euler-Bernoulli*.

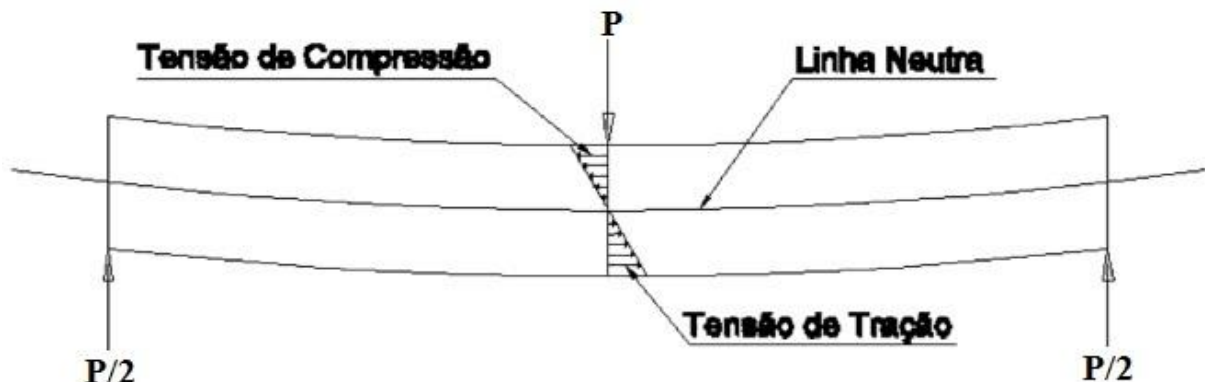


Figura 10: Distribuição de tensões em uma seção de viga de Euler-Bernoulli
Fonte: Adaptado Albuquerque e Kramar (2015)

Com isso exposto, calcula-se os campos de deslocamentos axial e transversal. Através desses deslocamentos, deriva-se a equação entre o deslocamento e deformação determinando assim as relações entre tensão e deformação. Por fim, chega-se a seguinte equação de equilíbrio energético:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} EI \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx - \int_0^{L_b} q w dx$$

Equação 4: Equação de energia de deformação a flexão

Fonte: Beghetto (2006)

Onde considera-se na equação de equilíbrio energético que:

- A primeira parcela representa a energia interna de deformação;
- A segunda parcela representa o trabalho produzido pelas forças externas.

Baseado nos estudos realizados por Reddy (1984), Beghetto (2006) determinou a equação diferencial de quarta ordem que governa o problema de flexão de vigas sujeitas à um carregamento transversal uniformemente distribuído. Precisando agora encontrar uma função que representasse o deslocamento (w) que o elemento finito possui, foi utilizado uma função polinomial cúbica, levando em consideração quatro condições de contorno essenciais (Equações 5); a rotação é representada pela primeira derivada em relação a (x), w' .

$$w(x, t) = c_1 + c_2 \left(\frac{x}{L}\right) + c_3 \left(\frac{x}{L}\right)^2 + c_4 \left(\frac{x}{L}\right)^3$$

Condições de contorno essenciais:

$$w_1(x, t) = w(0, t) = c_1$$

$$w_2(x, t) = w'(0, t) = \frac{c_2}{L}$$

$$w_3(x, t) = w(L, t) = c_1 + c_2 + c_3 + c_4$$

$$w_4(x, t) = w'(L, t) = \frac{c_2}{L} + \frac{2c_3}{L} + \frac{3c_4}{L}$$

Equação 5 – Equação polinomial cúbica e suas condições de contorno.

Fonte: Beghetto (2006)

Fazendo a determinação das constantes de integração “c” e as substituindo na fórmula citada acima, obtém-se as equações de *Hermite*; onde L é o comprimento do elemento finito.

$$H_1(x) = 1 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right)^3$$

$$H_2(x) = L\left(\frac{x}{L}\right) - 2L\left(\frac{x}{L}\right)^2 + L\left(\frac{x}{L}\right)^3$$

$$H_3(x) = 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3$$

$$H_4(x) = -L\left(\frac{x}{L}\right)^2 + L\left(\frac{x}{L}\right)^3$$

$$H_1(0) = 1, \quad H_1'(0) = 0, \quad H_1(L) = 0, \quad H_1'(L) = 0;$$

$$H_2(0) = 1, \quad H_2'(0) = 0, \quad H_2(L) = 0, \quad H_2'(L) = 0;$$

$$H_3(0) = 1, \quad H_3'(0) = 0, \quad H_3(L) = 0, \quad H_3'(L) = 0;$$

$$H_4(0) = 1, \quad H_4'(0) = 0, \quad H_4(L) = 0, \quad H_4'(L) = 0;$$

Equações 6 – Equações de *Hermite* e suas condições de contorno.

Fonte: Beghetto (2006)

A Figura 11 apresenta graficamente as funções interpoladoras de *Hermite*.

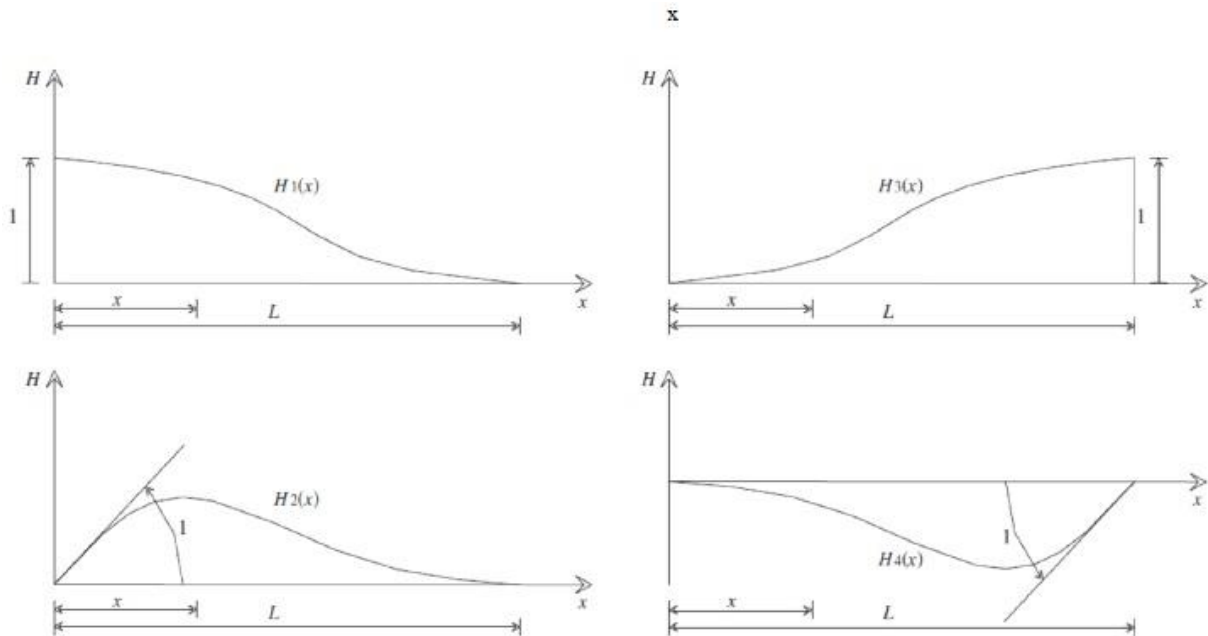


Figura 11: Funções interpoladoras de *Hermite*
Fonte: Beghetto (2011)

A partir da equação e *Hermite*, são determinadas as representações das energias cinética e potencial do elemento finito de viga. Com isso, é exposta a representação da matriz de rigidez do elemento finito da viga $[k_e]$:

$$[k_e] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

Equação 7: Matriz de rigidez do elemento finito de viga.
Fonte: Virgin et al. (2010)

Através dos esforços externos aplicados no elemento finito de viga ($\{F_e(t)\}$), levando em consideração o carregamento transversal uniformemente distribuído ($q(x)$) e utilizando a equação *Lagrangeana* de movimento, onde se aplicam as energias cinética, potencial de deformação e os esforços externos, se encontra a representação das equações de movimento do elemento finito na viga.

$$[m_e]\{\ddot{w}_e\} + [k_e]\{w_e\} = \{F_e(t)\}$$

Equação 8: Equação de movimento do elemento finito de viga em formato matricial
Fonte: Beghetto (2006)

Onde a primeira e a segunda parcela representam as forças inerciais e elásticas, respectivamente. Cada elemento da equação significa:

$[m_e]$ – matriz de massa do elemento finito de viga;

$[k_e]$ – matriz de rigidez do elemento finito de viga;

$\{\ddot{w}_e\}$ – vetor de aceleração;

$\{w_e\}$ – vetor de deslocamento;

$\{F_e(t)\}$ – esforços externos.

Os vetores de aceleração e de deslocamento, seguindo a formulação apresentada em Beghetto (2006), são dados através da seguinte maneira:

$$\{\ddot{w}_e\}^T = [\ddot{w}_1 \quad \ddot{w}_2 \quad \ddot{w}_3 \quad \ddot{w}_4] \quad e \quad \{w_e\}^T = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4]$$

Equação 9: Vetores de aceleração e de deslocamento

Fonte: Beghetto (2006)

Com essas equações, são representadas de forma matricial a massa $[M_B]$ e a rigidez $[K_B]$ da viga, o vetor de forças aplicadas à viga $\{F_B(t)\}$ e os vetores de deslocamentos $\{U_B\}$ e aceleração $\{\ddot{U}_B\}$ da viga; como se pode ver a seguir, para uma viga subdividida em n elementos e respeitando as condições de contorno e a conectividade entre os elementos:

$$[M_B] = \sum_{e=1}^n [m_e]; \quad [K_B] = \sum_{e=1}^n [k_e]; \quad \{F_B(t)\} = \sum_{e=1}^n \{F_e(t)\}; \quad \{U_B\} = \sum_{e=1}^n \{w_e\}; \quad \{\ddot{U}_B\} = \sum_{e=1}^n \{\ddot{w}_e\};$$

Equações 10: Representação matricial de elementos finitos

Fonte: Beghetto (2006)

Desta maneira as equações de movimento do sistema na forma matricial pode ser expressada conforme exposto a seguir:

$$[M_B]\{\ddot{U}_B\} + [K_B]\{U_B\} = \{F_B(t)\}$$

Equação 11: Equação de movimento do Sistema

Fonte: Beghetto (2006)

Com o método de *Rayleigh*, pode-se incluir o amortecimento no sistema matricial, assim conseguindo se apresentar o sistema completo de transmissão de esforços. Quando se faz a combinação linear das matrizes de massa e de rigidez, consegue-se elaborar a matriz de amortecimento $[C_B]$, segundo Chopra (1995, apud Beghetto, 2006, p.41).

$$[C_B] = \alpha_B [M_B] + \beta_B [K_B]$$

sendo:

$$\alpha_B = \frac{2\zeta_b \omega_{nb1} \omega_{nb2}}{\omega_{nb1} + \omega_{nb2}} \quad e \quad \beta_B = \frac{2\zeta_b}{\omega_{nb1} + \omega_{nb2}}$$

$$\omega_{nbn} = \frac{n^2 \pi^2}{L_b^2} \sqrt{\frac{EI}{m_u}} \quad \varnothing_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{L_b} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Equação 12: Matriz de amortecimento
Fonte: Adaptado de Beghetto (2006)

Considera-se que as variáveis apresentadas são:

$[C_B]$ – matriz de amortecimento da viga;

$[M_B]$ – matriz de massa da viga;

$[K_B]$ – matriz de rigidez da viga;

ζ_b – razão de amortecimento referente ao tipo específico da estrutura;

ω_{nb1} – primeira frequência natural de vibração;

ω_{nb2} – segunda frequência natural de vibração;

ω_{nbn} – n-ésima frequência natural para viga bi apoiada;

$\varnothing_n(x)$ – n-ésimo modo natural de vibração para viga bi apoiada;

m_u – massa unitária da viga.

Deve-se observar cuidadosamente as frequências naturais de vibração pois, caso a frequência de oscilação do sistema excitador coincidir com aquelas frequências citadas anteriormente, haverá um aumentando as amplitudes de vibração do sistema como um todo, (KÜSTER et al. (2011). Segundo Albuquerque e Kramar (2015), esse fenômeno físico é conhecido como ressonância e deve ser evitado em construções civis pelo fato de ocasionar deformações excessivas, desconforto ao usuário e em alguns casos causar ruína a estrutura excitada.

Por fim, com a definição das equações 10 e 11, é representado na Equação 13 a formulação matricial de movimento do sistema incluindo o amortecimento, como observa-se a seguir:

$$[M_B]\{\ddot{U}_B\} + [C_B]\{\dot{U}_B\} + [K_B]\{U_B\} = \{F_B(t)\}$$

Equação 13: Equação matricial de movimento do sistema incluindo o amortecimento
Fonte: Beghetto (2006)

3.2.1 Distribuição dos Esforços do Veículo

Os esforços do veículo distribuídos através das rodas quando diretamente aplicados sobre o elemento finito de viga são apresentados da seguinte maneira:

$$\{F_e(t)\} = F_{R_{2i}}(t) \begin{bmatrix} 1 - 3\left(\frac{vt}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{vt}{L}\right)^3 \\ L\left(\frac{vt}{L}\right) - 2L\left(\frac{vt}{L}\right)^2 + L\left(\frac{vt}{L}\right)^3 \\ 3\left(\frac{vt}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{vt}{L}\right)^3 \\ -L\left(\frac{vt}{L}\right)^2 + L\left(\frac{vt}{L}\right)^3 \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, 4$$

$$\{F_e(t)\} = F_{R_{2i-1}}(t) \begin{bmatrix} 1 - 3\left(\frac{vt}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{vt}{L}\right)^3 \\ L\left(\frac{vt}{L}\right) - 2L\left(\frac{vt}{L}\right)^2 + L\left(\frac{vt}{L}\right)^3 \\ 3\left(\frac{vt}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{vt}{L}\right)^3 \\ -L\left(\frac{vt}{L}\right)^2 + L\left(\frac{vt}{L}\right)^3 \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, 4$$

Equação 14: Distribuição dos esforços do veículo sobre os elementos finitos da viga através das rodas

Fonte: Adaptado de Beghetto (2006)

Onde tem-se:

$\{F_e(t)\}$ – esforços externos aplicados ao elemento finito de viga;

$F_{R_{2i}}(t)$ – esforços do veículo distribuídos através das rodas pares;

$F_{R_{2i-1}}(t)$ – esforços do veículo distribuídos através das rodas ímpares;

v – velocidade em função da abscissa (x);

t – tempo em função da abscissa (x);

L – comprimento do elemento finito de viga.

3.2.2 Modelo de Ponte Ferroviária

A superestrutura é modelada pelo sistema de bitolas métrica, ou seja, o espaçamento entre os trilhos é de 1 metro. Os trilhos são apoiados em dormentes espaçados entre si, eixo a eixo, por 0,57 metros que por sua vez são apoiados na viga da infraestrutura. A estrutura a qual se apoiam são formados por perfis de aço soldados tipo I. A disposição da superestrutura supracitada pode ser observada na Figura 12 e o detalhamento da mesma se encontra em anexo.



Figura 12: Ponte Ferroviária localizada no km 126+900 da ferrovia do Xisto.
Fonte: Autor (2016)

Como os elementos estruturais, vigas e trilhos, são fabricados em aço, o módulo de elasticidade (E) e a massa específica (ρ) foram considerados iguais. Desta maneira, pode-se modelar a ponte situada no km 126+900 da ferrovia do Xisto igualmente como foi representado por Beghetto em 2006. Também analisou-se o momento de inércia da seção transversal equivalente de cada viga como sendo a associação das seções transversais do trilho e do perfil, utilizando como referência o Teorema dos Eixos Paralelos ou Teorema de *Steiner*. A equação da inércia da seção transversal equivalente pode ser representada da seguinte maneira:

$$I_{eq} = (I_{x,v} + I_{x,t}) + A_t \cdot d^2$$

Equação 15: Inércia da seção transversal equivalente (Teorema de *Steiner*)

Fonte: Adaptado de Beghetto (2006)

Onde as variáveis são:

I_{eq} – inércia centroidal da seção transversal equivalente;

$I_{x,v}$ – momento de inércia centroidal da seção transversal da viga;

$I_{x,t}$ – momento de inércia centroidal da seção transversal do trilho;

A_t – área transversal do trilho;

d – distância entre o centro de área da viga e o centro de área do trilho.

Para ser de fácil visualização todos os elementos da superestrutura estudada neste caso e para facilitar o entendimento das dimensões necessárias para o cálculo da inércia transversal equivalente, é representado na Figura 13 a seguir uma vista espacial do modelo de ponte ferroviária.

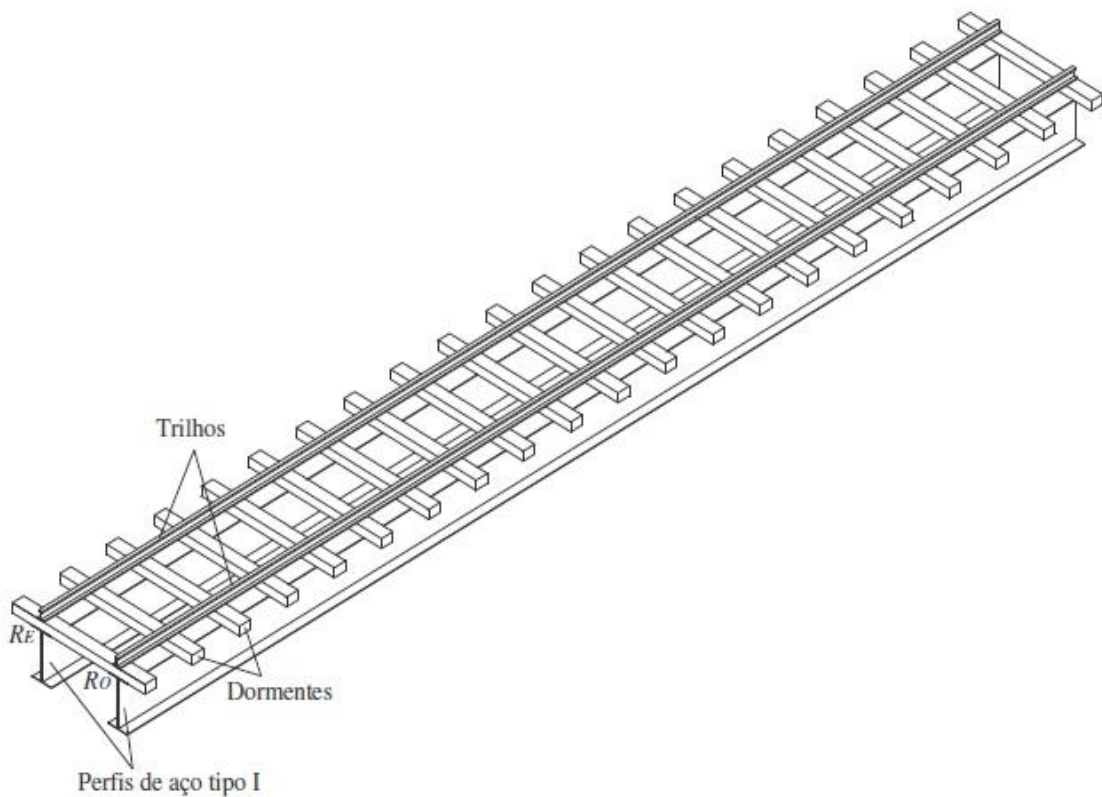


Figura 13: Vista espacial do modelo de ponte ferroviária

Fonte: Beghetto (2006)

Para se modelar a viga em elementos finitos, foi considerado que as duas vigas que se apoiam à superestrutura são idênticas e bi apoiadas. Os apoios que suportam as vigas I são representados como articulado fixo e articulado móvel para cada extremidade. Igualmente na pesquisa de Beghetto (2006), “cada viga é modelada por 20 elementos finitos de viga de iguais comprimentos interconectados totalizando 42 graus de liberdade” e cada elemento possui 1 metro de comprimento (L).

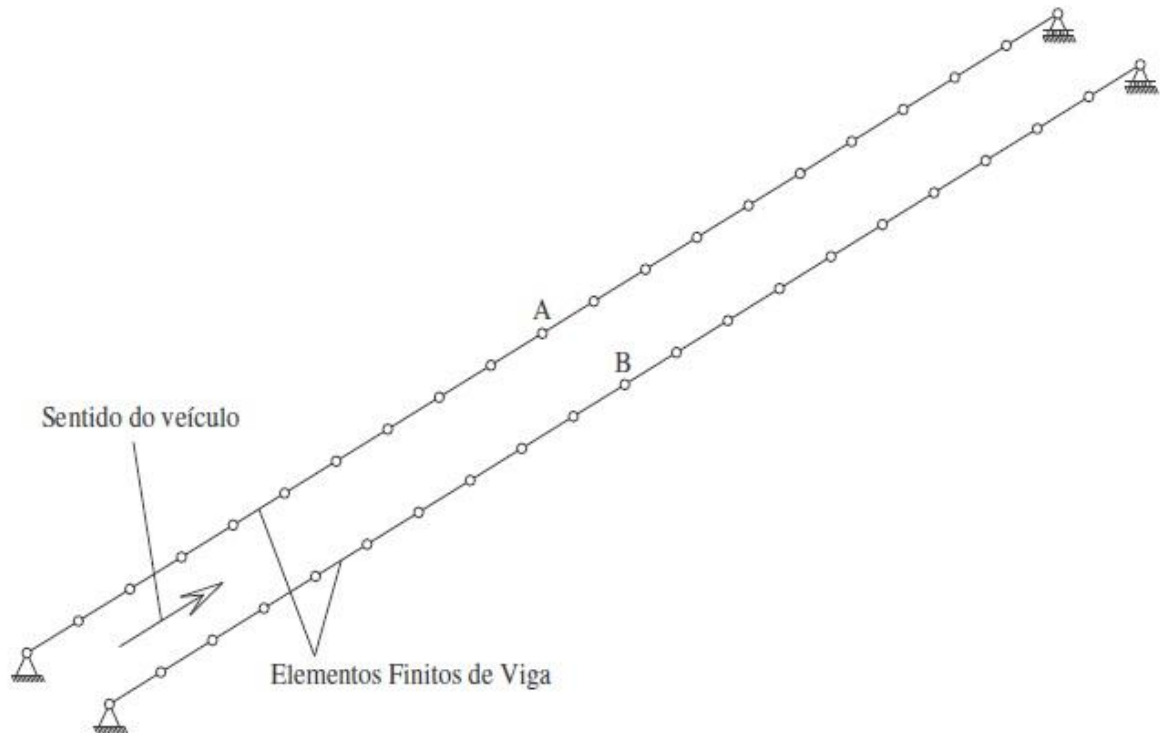


Figura 14: Ponte modelada por elementos finitos
Fonte: Beghetto (2006)

4 METODOLOGIA

Nesta seção, será apresentado detalhes do programa utilizado para a análise dinâmica da estrutura ferroviária assim como os dados necessários para a calibragem da programação feita nele.

Também nesta parte do trabalho será discorrido alguns detalhes importantes da aquisição dos dados do veículo e da ponte.

4.1 RECURSOS DE *SOFTWARE*

Para se fazer a análise dinâmica da ponte, foi utilizado o código implementado por Beghetto (2006) em ambiente MatLab[®]. Foi necessário fazer alterações em algumas variáveis que levam em conta as características físicas da superestrutura e do veículo ferroviário para que a modelagem fosse semelhante com o caso real estudado.

O veículo modelado foi uma locomotiva composto por oito rodas, dois truques e um vagão. A ponte foi modelada como 20 elementos finitos de 1 metro de comprimento longitudinal cada.

Para se realizar a análise estática e pseudo-estática da ponte foi utilizado o *software* FTOOL – Educational Version 3.0 – Version Lisboa apenas para a elaboração da disposição da configuração deformada da viga e demonstrar o perfil I da seção transversal da viga.

4.2 RECURSOS DE *HARDWARE*

Os recursos de *hardware* utilizados consistem em um computador composto pela seguinte configuração:

- Processador: Intel[®] Core™ 2 Duo 2.40 GHz.
- Memória instalada (RAM): 4,00 GB 1067 MHz DDR3
- Gráfico: NVIDIA GeForce 320M 256 MB
- Sistema Operacional: OS X Yosemite

Com esta configuração de *hardware*, cada simulação feita durou aproximadamente 5 segundos.

4.3 DADOS NECESSÁRIOS

Os dados do veículo e da ponte utilizados para a calibração do modelo em elementos finitos foram conseguidos através das fontes: Beghetto (2006), Assunção (2009) e RUMO ALL (2015).

4.3.1 Veículo Ferroviário Modelado

Para analisar as respostas dinâmicas no centro da ponte ferroviária, foi considerado a locomotiva diesel-elétrica G22U (Figura 15) que possui truques de dois eixos de tração, rodagem B-B, que é muito utilizada na região sul do país pela RUMO. Esta locomotiva usualmente faz o transporte de *commodities*, mercadorias de baixo valor agregado, através de composições de vagões, como por exemplo o HFE 090839-9 HOPPER FECHADO (Figura 16). Os dados detalhados desses dois veículos se encontram no Anexo 1 e Anexo 2, respectivamente.



Figura 15: Locomotiva modelo G22U, com rodagem B-B
Fonte: VFCO (2016)



Figura 16: Vagão HFE 090839-9 HOPPER FECHADO da empresa Cargill
Fonte: VFCO (2016)

Os dados dos corpos rígidos referentes as propriedades de massa dos componentes do veículo ferroviário como, massa e momento de inércia de massa em relação aos eixos X e Y , estão representados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Propriedades de massa dos componentes do veículo.

<u>Propriedades de massa dos componentes do veículo</u>				
CORPOS RÍGIDOS	PARÂMETROS	SÍMBOLOS	VALORES	UNIDADES
Locomotiva	massa	m_{CB}	40840	kg
	momento de inércia de massa em X	$I_{X CB}$	693735,4666	kgm^2
	momento de inércia de massa em Y	$I_{Y CB}$	53364,26666	kgm^2
Truque Dianteiro	massa	m_{FB}	14000	kg
	momento de inércia de massa em X	$I_{X FB}$	26469,468	kgm^2
	momento de inércia de massa em Y	$I_{Y FB}$	11150,037	kgm^2
Truque traseiro	massa	M_{RB}	14000	kg
	momento de inércia de massa em X	$I_{X RB}$	26469,468	kgm^2
	momento de inércia de massa em Y	$I_{Y RB}$	11150,037	kgm^2
Rodas	Massa	m_w	770	kg

Fonte: Adaptado de Beghetto (2006)

Dados referentes as propriedades dinâmicas dos sistemas de suspensão primária e secundária, rigidez (k) e amortecimento viscoso (c), estão sendo apresentadas na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Propriedades dinâmicas dos sistemas de suspensão

<u>Propriedades dinâmicas dos sistemas de suspensão</u>				
SISTEMA	PARÂMETROS	SÍMBOLOS	VALORES	UNIDADES
Suspensão primária	RIGIDEZ (mola)	K_{Pi}	1606090,373	N/m
	AMORTECIMENTO (viscoso)	C_{Pi}	31151,655	Ns/m
Suspensão secundária	RIGIDEZ (mola)	K_{Si}	429509,6322	N/m
	AMORTECIMENTO (viscoso)	C_{Si}	17089,02	Ns/m

Fonte: Adaptado Beghetto (2006)

As distâncias longitudinais dos centros dos truques ($2a$) e das rodas ($2b$), e também a distância transversal dos centros das rodas ($2c$), que podem ser observadas no Anexo 1, estão sendo apresentadas na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3: Distâncias Geométricas

<u>Distâncias Geométricas</u>			
DISTÂNCIAS	SÍMBOLOS	VALORES	UNIDADES
Distância longitudinal dos centros dos truques	2 a	11,0	m
Distância longitudinal dos centros das rodas	2 b	3,0	m
Distância transversal dos centros das rodas	2 c	1,0	m

Fonte: Adaptado Beghetto (2006)

As irregularidades foram consideradas com uma amplitude (A_R) igual a 0,01 metro e o comprimento de onda (l_w) sendo igual a 1 metro.

4.3.2 Análise Estática da Ponte

Para realizar a análise estática da ponte, o deslocamento no centro do vão de uma viga I composto por material homogêneo e contínuo, foi utilizado a Teoria dos Eixos Paralelos ou Teoria de *Steiner* (Equação 15) para encontrar-se a inércia equivalente da superestrutura e posteriormente para uma viga simplesmente apoiada solicitada por duas cargas concentradas (Figura 17) utiliza-se um caso particular da Teoria da Linha Elástica (Equação 16), como observa-se a seguir:

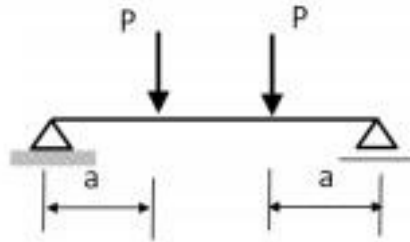


Figura 17: Viga simplesmente apoiada solicitada por duas cargas concentradas
Fonte: Hallack et al. (2015)

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{P}{24 \cdot E \cdot I} (3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2)$$

Equação 16: Equação do deslocamento máximo no centro da viga para 2 cargas concentradas
Fonte: Adaptado de Hallack et al. (2015)

Onde as variáveis são:

$\delta_{m\acute{a}x}$ – deslocamento máximo no centro da viga;

P – carga concentrada aplicada na viga;

E – módulo de elasticidade da viga;

I – momento de inércia da seção transversal da viga;

l – comprimento longitudinal da viga;

a – distância entre apoio e carga concentrada.

4.3.3 Análise Pseudo-Estática da Ponte

Para analisar o comportamento do deslocamento vertical no centro da ponte ferroviária, será utilizado a Equação 16 em conjunto com a NBR 7187 (ABNT, 2003) que diz respeito ao “Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento”. Esta norma possibilita assimilar as cargas móveis atuantes na superestrutura como sendo uma carga estática majorada por um coeficiente de impacto.

O coeficiente de impacto, para obras ferroviárias com vãos iguais, pode ser descrito pela Equação 17, segundo o item 7.2.1.2 da norma supracitada:

$$\varphi_f = 0,001 \cdot (1600 - 60\sqrt{l} + 2,25 \cdot l) \geq 1,2$$

Equação 17: Coeficiente de impacto para obras ferroviárias
Fonte: NBR 7187 (ABNT, 2003)

Onde tem-se:

φ_f – coeficiente de impacto para obras ferroviárias;

l – comprimento de cada vão teórico do elemento carregado, qualquer que seja o sistema estrutural, em metros.

Através da equação do coeficiente de impacto para obras ferroviárias com vãos iguais, pode-se plotar um gráfico que demonstra que quanto menor for o vão entre os apoios da superestrutura, mais solicitante a carga atuante será. Na Figura 18 abaixo, pode-se notar isso:

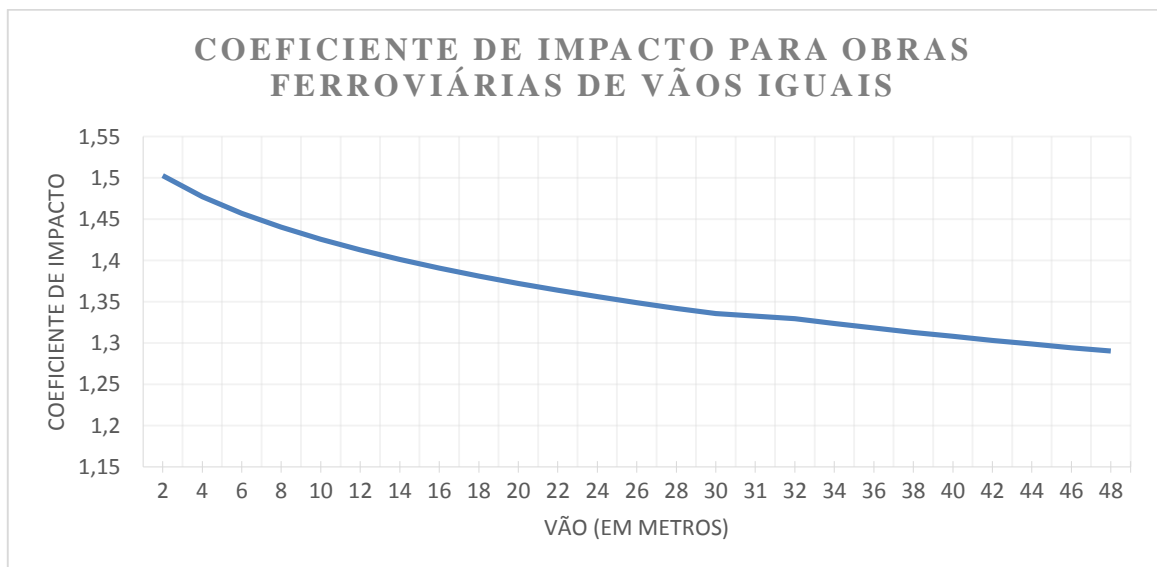


Figura 18: Coeficiente de impacto x vão para pontes ferroviárias de vãos iguais
Fonte: Autor

4.3.4 Análise Dinâmica da Ponte

Para fazer a análise dinâmica da ponte estudada foi necessário obter informações detalhadas sobre o projeto (tipologia dos apoios, dimensões dos elementos estruturais, materiais utilizados na construção, disposição estrutural, especificação técnica dos trilho e dormentes, entre outros). Com isso, para conseguir tais informações entrou-se em contato o engenheiro Matheus Hella que trabalha na empresa RUMO LOGISTICA. As figuras a seguir são referentes as especificações de projeto fornecido pelo engenheiro supracitado. O detalhamento completo da superestrutura se encontra em anexo.

Na Figura 19, é possível observar a disposição lateral da superestrutura. Nela observa-se o encontro de duas vigas I, fabricadas em aço, apoiadas sobre dois pilares dispostos no centro do Rio Barigui.



Figura 19: Vista Lateral Ponte Ferroviária do km 126+900
Fonte: RFFSA (1992)

Observa-se na Figura 20 uma vista inferior da ponte estudada. Nela é possível notar a existência de contraventamentos na parte inferior e superior das vigas, que as mantem com uma distância transversal constante e que auxilia na diminuição do comprimento de flambagem. Também é possível observar que os dormentes estão dispostos longitudinalmente a uma

distância igual e que o comprimento transversal dos mesmos é superior ao comprimento total do conjunto das vigas I.

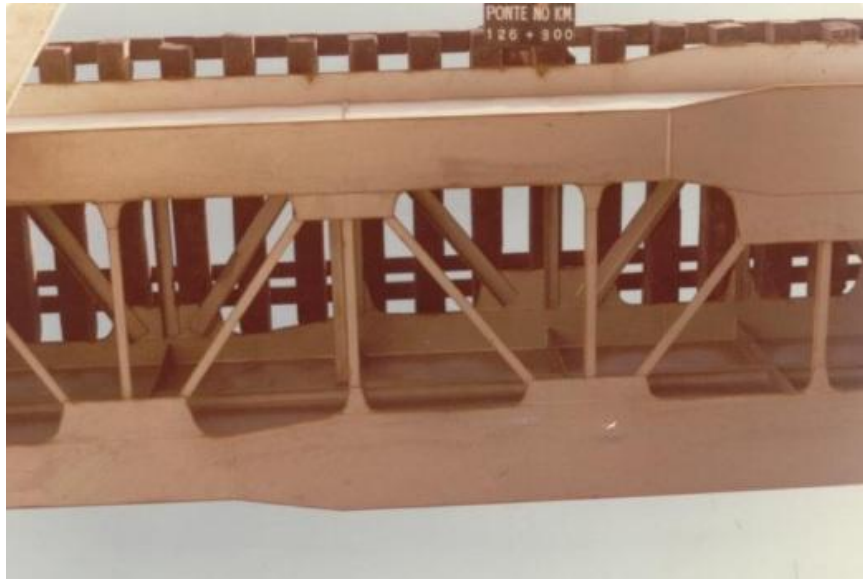


Figura 20: Vista Inferior da Ponte Ferroviária do km 126+900
Fonte: RFFSA (1992)

A ponte estudada é uma superestrutura isostática, ou seja, composta por um apoio articulado fixo e um apoio articulado móvel. Na Figura 21 é possível observar a disposição construtiva de um apoio articulado móvel, que possibilita a rotação e movimentação da viga no eixo longitudinal porém fixa no eixo vertical.



Figura 21: Apoio das Vigas de Aço da Ponte Ferroviária do km 126+900
Fonte: RFFSA (1992)

Na Figura 22 é possível ver a transição entre a cabeceira da superestrutura e da ponte propriamente dita, locais de maior e menor rigidez, respectivamente. Também pode-se analisar que o espaçamento entre os trilhos na ponte é menor que o espaçamento na cabeceira. A fixação dos trilhos é feita por tirafôes em ambos os patins dos trilhos, com a presença de dois contra trilhos no centro para aumentar a resistência a esforços transversais ocasionados pelo movimento de lancete da composição ferroviária. Nas extremidades dos dormentes existe um elemento estrutural que os interliga para evitar que o espaçamento entre os mesmos varie com a passagem da locomotiva e vagões.

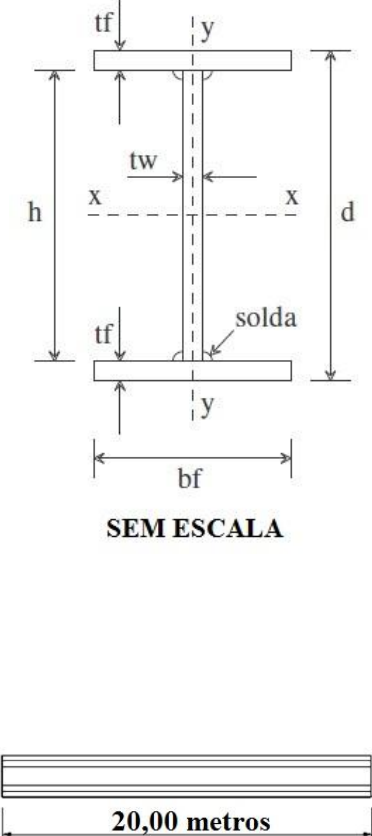


Figura 22: Detalhamento Longitudinal da Ponte Ferroviária do km 126+900

Fonte: RFFSA (1992)

A partir do projeto detalhado da superestrutura, alguns dados importantes para a calibração da rotina elaborada em *MATLAB* por Beghetto (2006) foram coletadas. Na Tabela 4 são apresentadas informações referentes as vigas I da ponte ferroviária como altura do perfil (d), altura da alma (h), largura da mesa (bf), espessuras da mesa (tf) e alma (tw), entre outras informações.

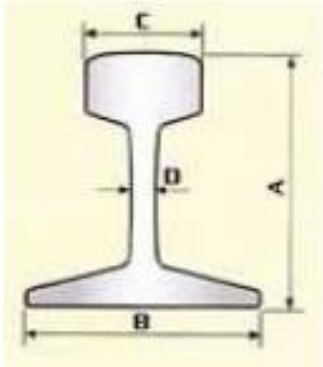
Tabela 4: Dimensões e propriedades do perfil metálico I

Perfil de aço soldado tipo (I)				
 <p>SEM ESCALA</p> <p>20,00 metros</p>	Dimensões e propriedades	Símbolos	Valores	Unidades
	Altura do perfil	d	1850	mm
	Altura da alma	h	1800	mm
	Largura da mesa	bf	400	mm
	Espessura da mesa	tf	25	mm
	Espessura da alma	tw	25	mm
	Área de seção transversal	A_p	650	cm ²
	Massa por metro linear	m_{up}	510,25	kg/m
	Momento de Inércia em relação ao eixo x-x	I_{xp}	2880416,66	cm ⁴
	Momento de Inércia em relação ao eixo y-y	I_{yp}	26900	cm ⁴
	Momento de inércia à torção	I_{tp}	2907320	cm ⁴
	Raio de giração em relação ao eixo x-x	rx	66,56	cm
	Raio de giração em relação ao eixo y-y	ry	6,43	cm
	Raio de giração da seção em relação ao eixo y-y-	rt	66,87	cm
	Módulo de resistência da seção em relação ao eixo x-x	W_x	31200	cm ³
	Módulo de resistência da seção em relação ao eixo y-y	W_y	1345	cm ³
	Módulo de elasticidade	E	205	GPa
	Massa específica	ρ	7850	kg/m ³

Fonte: Adaptado Beghetto (2006) e Albuquerque e Kramar (2015)

A tipologia do trilho utilizado nesta malha ferroviária que se encontra a superestrutura é especificada pela *Union Internationale des Chemins de fer* (UIC, União Internacional dos Caminhos de Ferro, tradução livre). Na Tabela 5 é apresentado características do trilho UIC-60 como a altura do trilho (A), comprimento transversal do patim (B) e do boleto (C), espessura da alma do trilho (D), área transversal total (A_t), massa por metro (m_{ut}), entre outras informações relevantes.

Tabela 5: Dimensões e propriedades do perfil do trilho.

Trilho UIC-60			
Dimensões e propriedades	Símbolos	Valores	Unidades
	A	172	mm
	B	150	mm
	C	74,3	mm
	D	16,5	mm
	A _{tr}	0,007688	m ²
	m _{ut}	60,34	kg/m
	I _{xt}	3055	cm ⁴
	E	205	GPa
	ρ	7850	kg/m ³

Fonte: Adaptado Beghetto (2016)

Com os dados supracitados, e utilizando o Teorema dos Eixos Paralelos de *Steiner*, calculou-se de momento de inércia da estrutura como um todo. Para isso, levando-se em consideração os momentos de inércias da viga em aço e o trilho em questão.

Para calcular a velocidade que causará ressonância na ponte, é preciso estabelecer as frequências naturais de vibração e frequências amortecidas do sistema. Segundo Chopra (1994, apud BEGHETTO, 2006, p. 69) adotando-se a razão de amortecimento (ζ_b) como sendo 2,5% e utilizando o código implementado por Beghetto (2006) é possível obter as frequências naturais (ω_{nt}) para calcular as frequências de amortecimento do sistema (ω_{RD}), que é obtida através da Equação 18, representada a seguir:

$$\omega_{db} = \omega_{nt} \sqrt{1 - 2\zeta_b^2}$$

Equação 18: Frequência amortecida de vibração

Fonte: Beghetto (2006)

A Equação 19 refere-se a velocidade ressonante (V_{RD}) devido a passagem do veículo ferroviário pela ponte, onde (l_w) é o comprimento da onda senoidal.

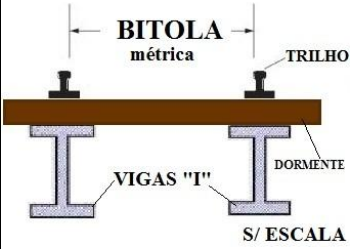
$$V_{RD} = \frac{\omega_{db} \cdot l_w}{2 \cdot \pi}$$

Equação 19: Velocidade ressonante do veículo na ponte

Fonte: Beghetto (2006)

Os valores calculados estão representados na Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades utilizadas no modelo de elementos finitos.

	Propriedades das vigas	Símbolos	Valores	Unidades
	Comprimento	L_b	20	m
	Área de seção transversal	A	0,065	m ²
	Momento de inércia	I	0,04367	m ⁴
	Módulo de elasticidade	E	205	GPa
	Massa específica	ρ	7850	kg/m ³
	Massa unitária	m_u	510,25	kg/m
	Razão de amortecimento	ζ_b	2,5	%
	1° Frequência natural	ω_{nb1}	75,7283	rad/s
	2° Frequência natural	ω_{nb2}	208,794	rad/s
	1° Frequência natural amortecida	ω_{db1}	75,6809	rad/s
	2° Frequência natural amortecida	ω_{db2}	208,663	rad/s

Fonte: Adaptado de Beghetto (2006)

Segundo informação que consta na especificação técnica da locomotiva modelo G22U, Anexo 1, fabricada na Espanha, entre os anos de 1971 à 1973, pela empresa *Macosa* sob licença da *General Motors (GM) – Electro Motive Diesel (EMD)*, a faixa de velocidade operacional está entre 21,7 km/h e 97 km/h. Portanto, a faixa de velocidade considerada nos estudos dinâmicos estará entre 20 km/h à 100 km/h.

Por fim, observa-se na Figura 23, que pelo fato da superestrutura ser simétrica longitudinalmente e assumindo que possuir os mesmos elementos estruturais em ambos os vão, os deslocamentos centrais de cada vão serão iguais.

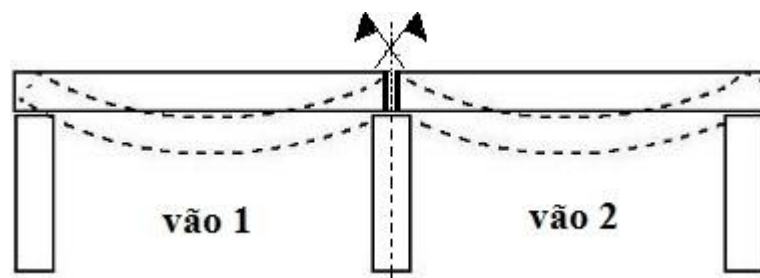


Figura 23: Simetria longitudinal da superestrutura

Fonte: Autor

5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE ESTÁTICA

Para se fazer a análise estática, considerou-se o caso mais desfavorável de solicitação para a ponte, no caso o truque da locomotiva localizando-se no centro do primeiro vão da viga. A Figura 24 demonstra didaticamente a solicitação supracitada.

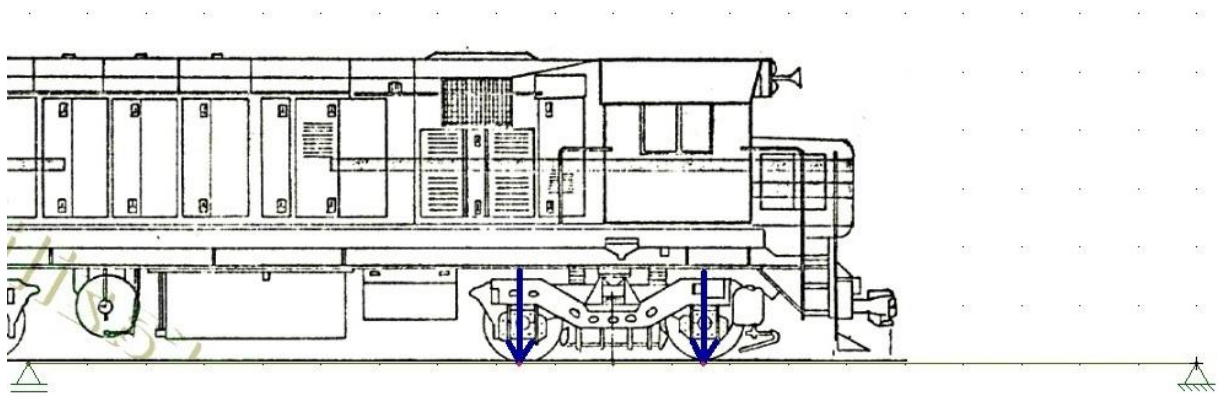


Figura 24: Representação do caso mais desfavorável de solicitação - Caso A

Fonte: Autor

O resultado do deslocamento central do vão da viga de aço de perfil I encontrado, utilizando a equação da linha elástica, levando em consideração o posicionamento de duas cargas concentradas foi de 3,315 mm, como pode-se ver na Figura 25. O carregamento pontual de solicitação é representado pela carga total do veículo dividido por 8 pontos de contato com o trilho, 8 rodas. A carga aplicada em cada ponto foi de 91,96875 kN.

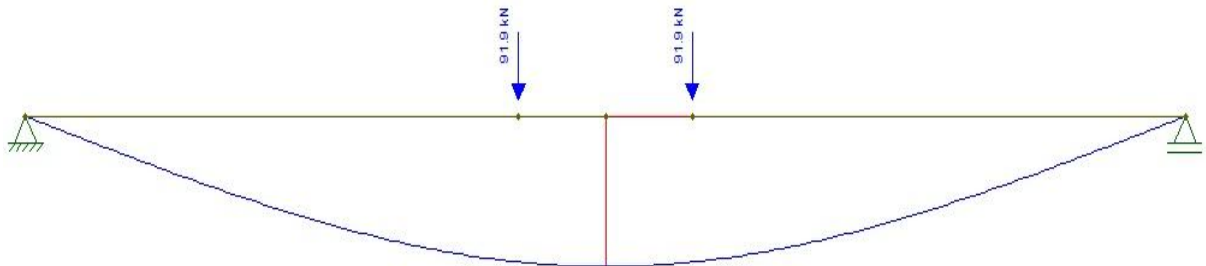


Figura 25: Deslocamento no centro do vão da viga I – Análise estática

Fonte: Autor

5.2 ANÁLISE PSEUDO-ESTÁTICA

A análise chamada de Pseudo-Estática, leva-se em consideração a análise estática majorada pelo coeficiente de impacto da norma NBR 7187, que permite assimilar cargas móveis a cargas estáticas.

O coeficiente de impacto, que leva em consideração apenas o comprimento do vão da obra ferroviária (Equação 17), para uma distância entre apoios de 20 metros é igual a 1,37667.

Para determinar a carga majorada, multiplicou-se o coeficiente de impacto por 1/8 do peso total da locomotiva, resultando em uma sollicitação por ponto de contato roda/trilho de 126,610 kN.

O deslocamento do centro de um dos vãos da superestrutura, utilizando a carga majorada, foi de 4,564 mm.

5.3 ANÁLISE DINÂMICA

Para entender o gráfico dos deslocamentos do centro do vão da viga, o esquema a seguir exemplifica a posição, em relação ao tempo, da locomotiva transitando sobre a ponte.

O Caso A, Figura 24, representa o exato momento em que carregamento do truque frontal da locomotiva encontra-se no centro do vão da viga.

No Caso B, Figura 26, é apresentada a situação em que o centro geométrico da locomotiva está alinhado com o centro geométrico do primeiro vão da superestrutura.

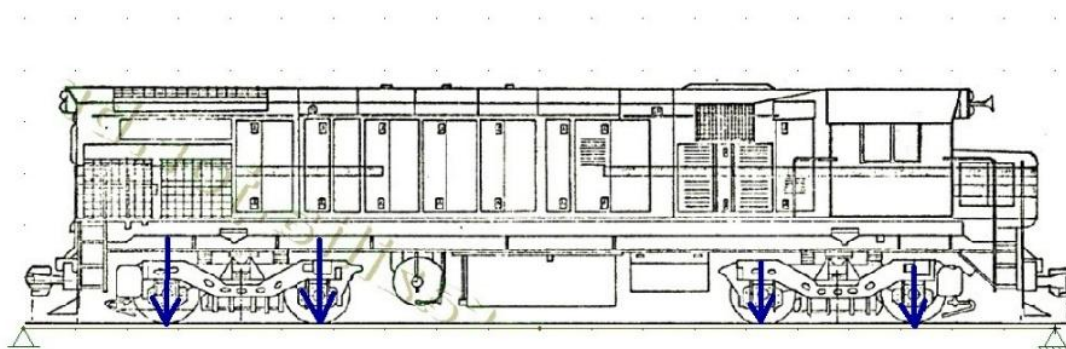


Figura 26: Veículo ferroviário transferindo seu carregamento para ponte - Caso B

Fonte: Autor

No Caso C, Figura 27, observa-se o truque traseiro do veículo ferroviário localizado no centro do vão da viga I, semelhante ao caso A citado anteriormente.

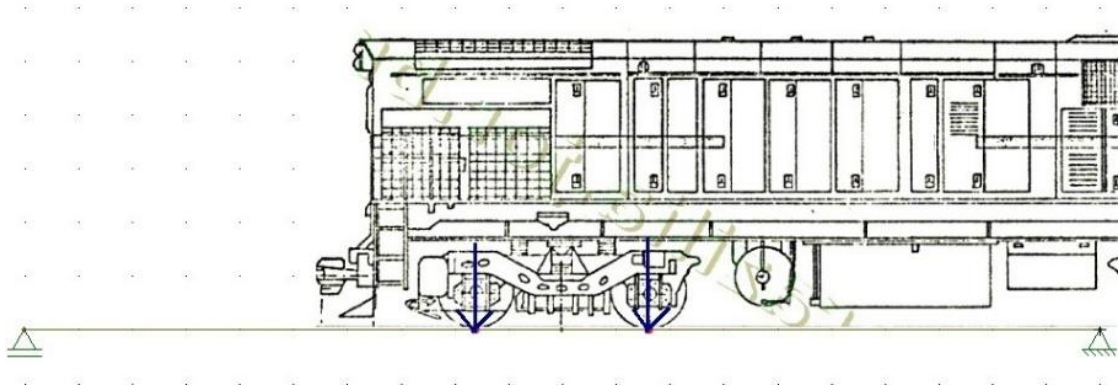


Figura 27: Veículo ferroviário transferindo seu carregamento para a ponte - Caso C
Fonte Autor

Na Figura 28 é representado, em relação ao tempo, os deslocamentos do centro do vão da viga em análise, onde os maiores deslocamentos ocorrem nos casos A e C.

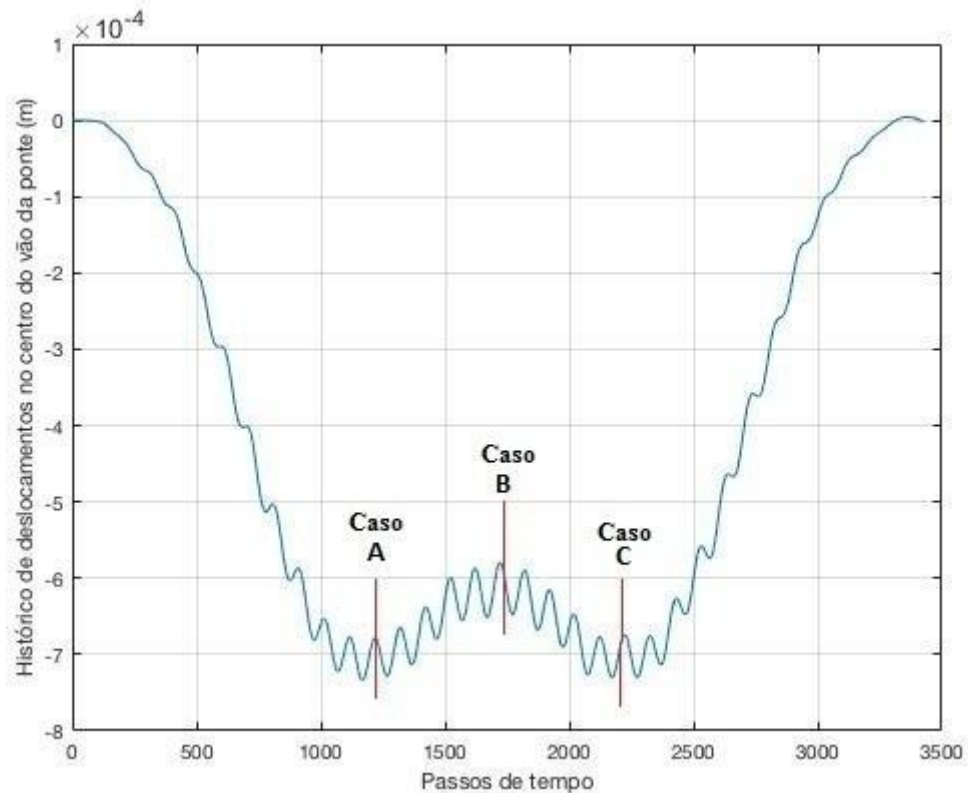


Figura 28: Gráfico dos deslocamentos do centro do vão da viga I - Casos A, B e C
Fonte: Autor

Para estudar o comportamento dinâmico do centro do vão da superestrutura, e levando em consideração como referencial a velocidade operacional da locomotiva, analisou-se o histórico dos deslocamentos do centro da viga, do primeiro vão da ponte, variando a velocidade unitariamente entre os intervalos de 20 km/h à 100 km/h.

Na simulação realizada a velocidade de 20 km/h, Figura 29, é representado o histórico dos deslocamentos do centro do vão da viga I. O valor máximo encontrado foi de 0,99158mm.

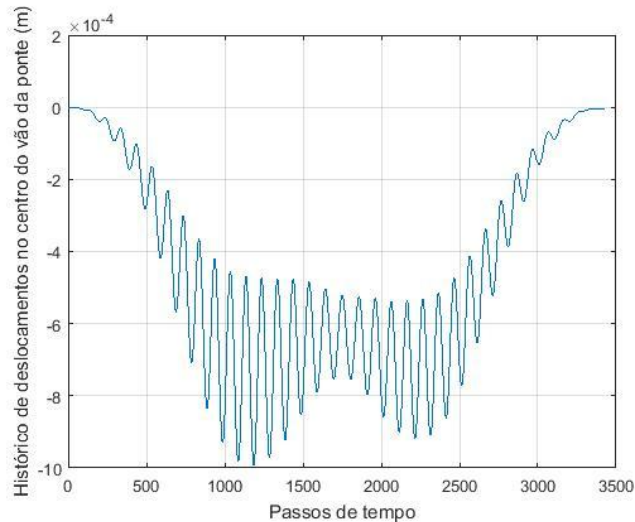


Figura 29: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 20 km/h

Fonte: Autor

Foi possível notar que entre as velocidades de 20 à 38 km/h o gráfico do histórico de deslocamentos manteve o mesmo formato e apenas tendo um aumento da amplitude do deslocamento central do vão da viga com o aumento da velocidade, Figura 30.

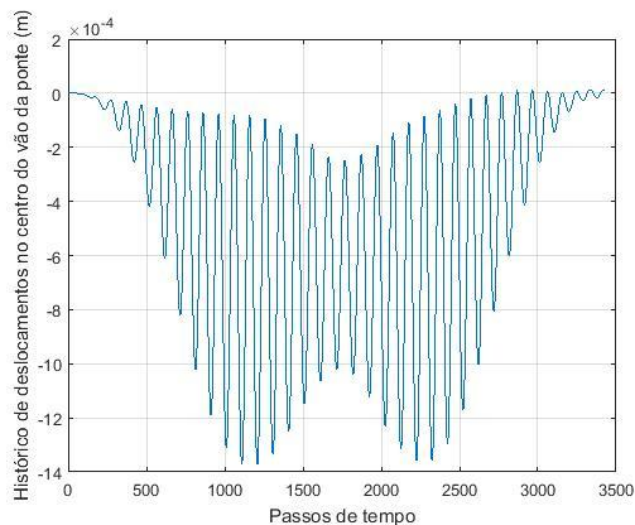


Figura 30: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 38 km/h

Fonte: Autor

Quando o veículo ferroviário transpassa a ponte à uma velocidade de 39 km/h, Figura 31, observa-se graficamente que o deslocamento central da viga assume valores positivos (cristas no gráfico). Segundo INMAN (1996, apud BEGHETTO, 2006, p. 76) esse fenômeno é conhecido como batimento e pode ser observado quando os deslocamentos assumem uma rápida oscilação com uma baixa variação de amplitude.

Este ocorre, pois há a superposição de ondas de mesma direção, mesmas amplitudes e frequências próximas. Estas ondas são os esforços do veículo os quais são transmitidos à ponte através dos pontos de contato das rodas com os trilhos. (Beghetto, p.76, 2006).

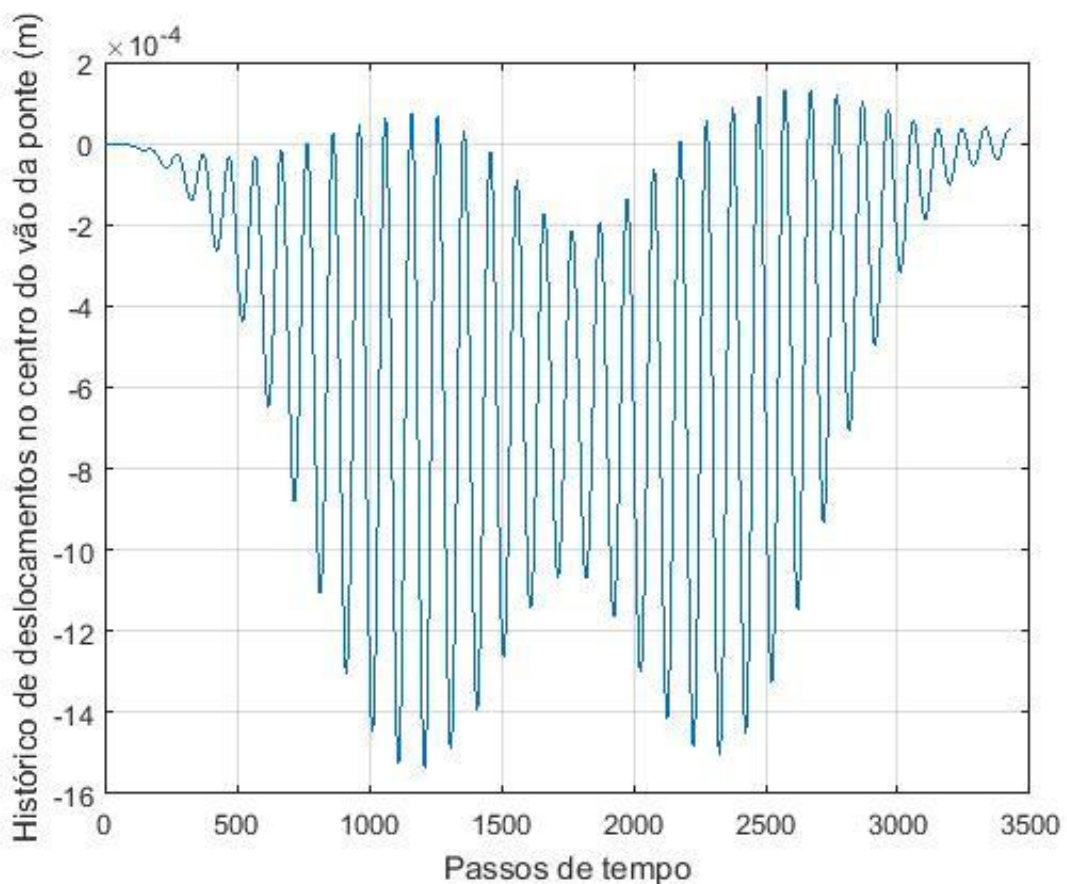


Figura 31: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 39 km/h

Fonte: Autor

O fenômeno “batimento”, onde os deslocamentos oscilam entre valores positivos e negativos, quando considerado um longo período de tempo, pode vir a danificar o material da viga da ponte. Este dano ocorrerá devido a fadiga do material, que acontece quando existe um ciclo repetitivo de solicitações contrárias de tração e de compressão (Beghetto, 2006).

A faixa de velocidade crítica para se fazer a travessia da ponte utilizando o veículo ferroviário estudado está entre 39 à 49 km/h. O maior deslocamento do centro do vão da viga é observado à 44 km/h, atingindo um valor máximo absoluto de 3,31mm. Nesta velocidade ocorre o fenômeno de ressonância, como é observado na Figura 32.

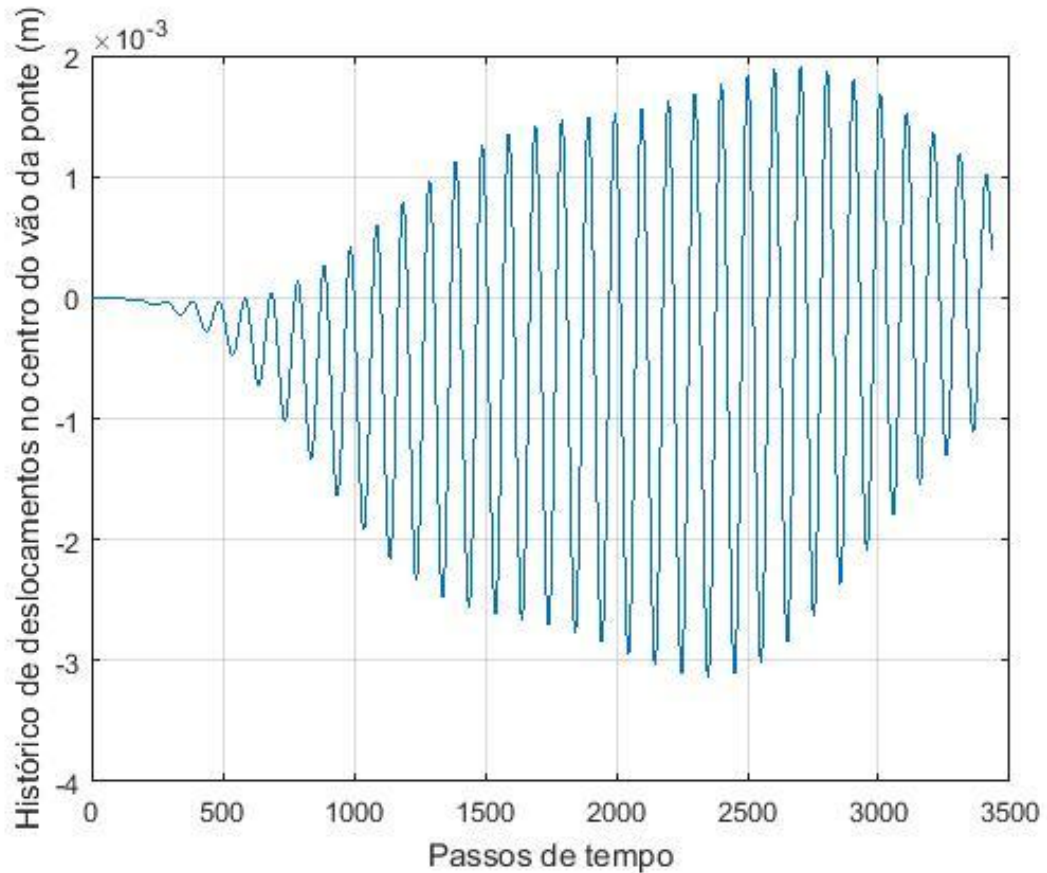


Figura 32: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 44 km/h.

Fonte: Autor

Utilizando a Equação 19, pode-se calcular analiticamente as velocidades ressonantes para a ponte em estudo. Na Tabela 7 é apresentada a primeira (V_{Rb1}) e a segunda (V_{Rb2}) velocidade ressonante da ponte quando a amplitude (A_R) e o comprimento da irregularidade (l_w) da via são de 0,01 m e 1 metro, respectivamente.

Tabela 7: Velocidades ressonantes para a ponte

Velocidades ressonantes para a ponte		
V_{Rb}	(m/s)	(km//h)
V_{Rb1}	12,0512	43,38432
V_{Rb2}	33,2266	119,61576

Fonte: Autor

Após a velocidade de 50 km/h, foi observado que o fenômeno denominado de batimento deixa de ocorrer e que o máximo deslocamento no centro do vão da viga I é de 1,2mm. Na Figura 33 é apresentado o histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte à 50 km/h.

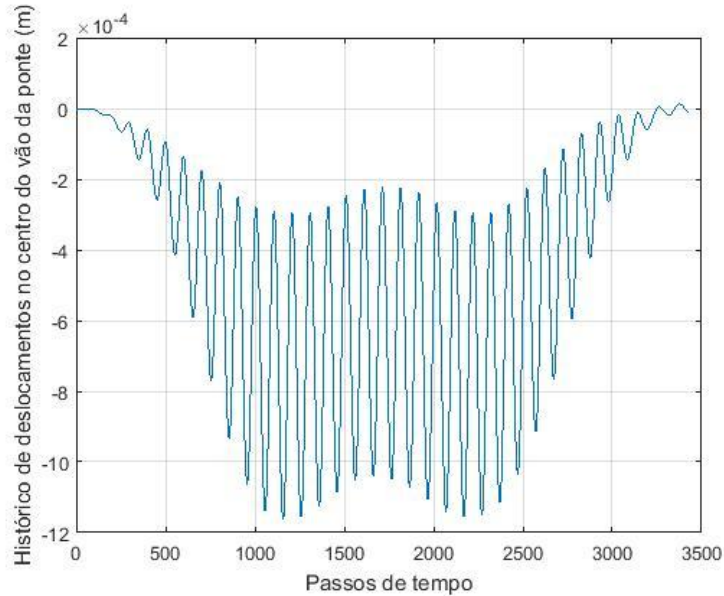


Figura 33: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 50 km/h

Fonte: Autor

Entre as velocidades de 50 km/h a 100 km/h notou-se que com o aumento da velocidade diminuiu as amplitudes e deslocamentos do centro do vão da viga. Na Figura 34, observa-se que os deslocamentos são bem definidos e as amplitudes da onda são baixas.

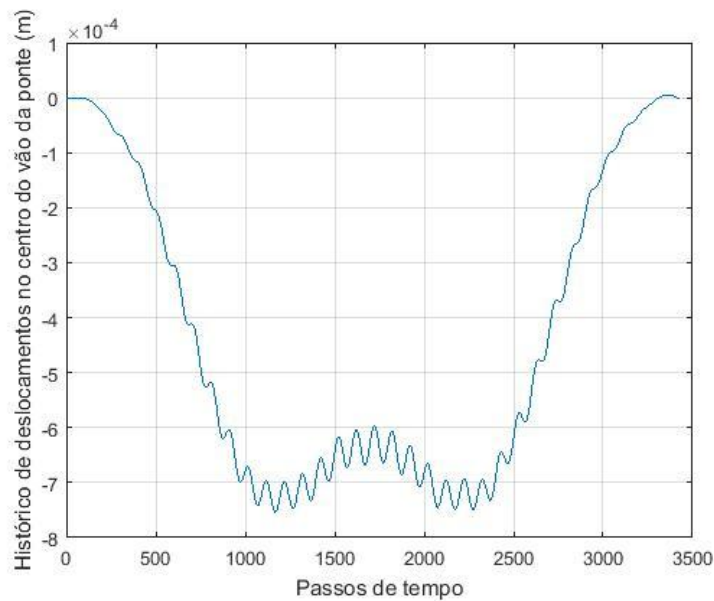


Figura 34: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte a 100 km/h

Fonte: Autor

Na Figura 35, são apresentados todos os deslocamentos máximos do centro da vigas I do vão da superestrutura, obtidos entre a faixa de velocidade operacional da locomotiva modelo G22U-BB.

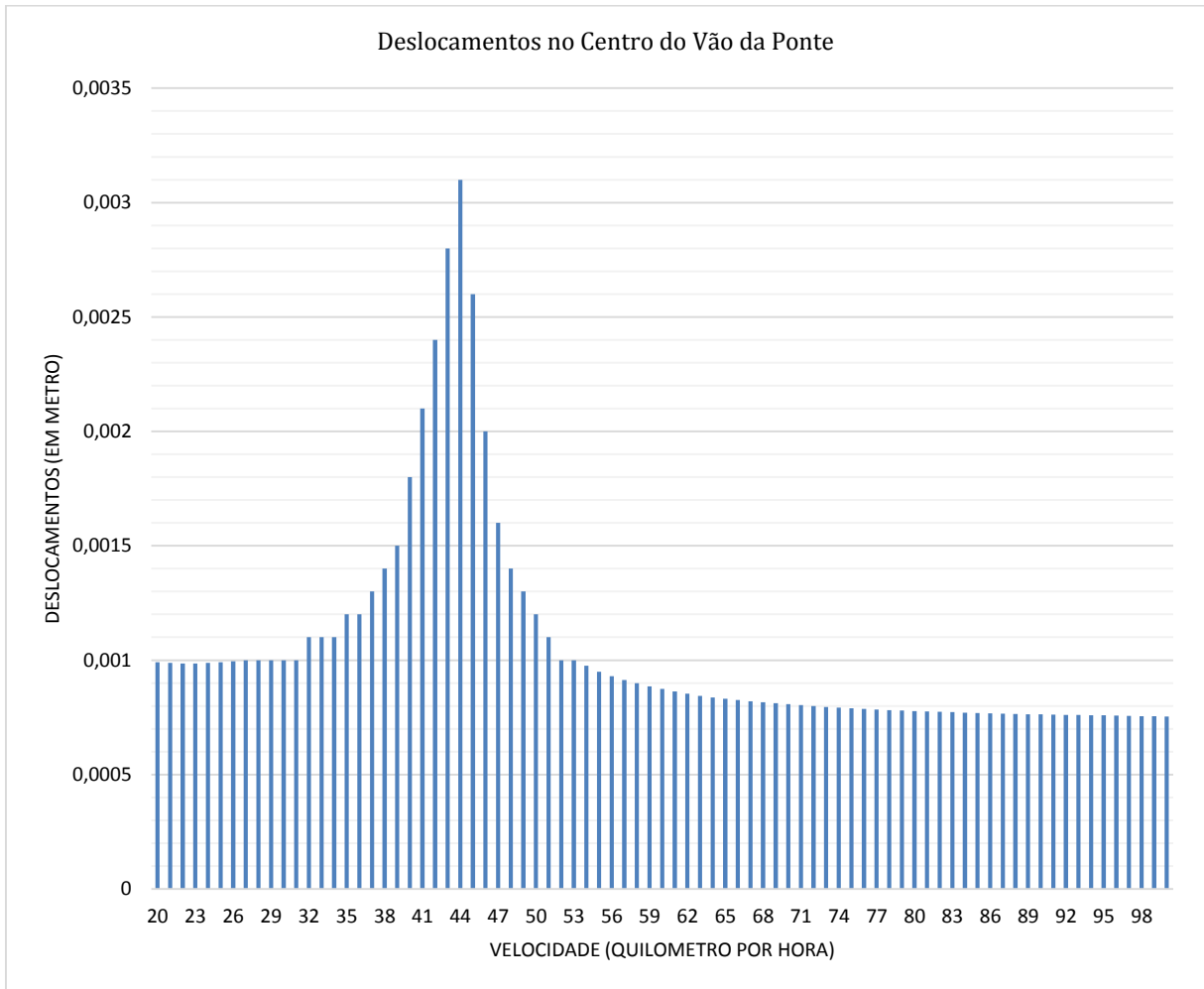


Figura 35: Histórico dos deslocamentos no centro do vão da ponte X velocidades

Fonte: Autor

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No modelo estático, considerando o caso mais desfavorável que é sendo o truque da locomotiva localizado no centro do vão da viga da superestrutura, e que as cargas atuante são referentes a apenas o peso do veículo dividido por oito pontos de contatos, o deslocamento máximo encontrado foi de 3,315 mm.

O modelo pseudo-estático, que leva em consideração a carga estática majorada pelo coeficiente de impacto ($\phi_f = 1,377$), NBR 7187 (ABNT, 2003), e levando em consideração as mesmas premissas do modelo estático, o máximo deslocamento no centro da viga I foi de 4,564 mm.

Por fim, no modelo dinâmico, foram feitas simulações variando a velocidade em que o veículo ferroviário transita sobre a ponte, velocidade esta que se encontra entre as velocidades de operação da locomotiva. Neste caso, a carga atuante na superestrutura considerada foi o peso próprio do veículo dividido por oito pontos de contatos mais uma parcela referente a inercia da massa das rodas da locomotiva. Observou-se que o máximo deslocamento encontrado no centro da viga I foi de 3,31mm a uma velocidade de 44 km/h, muito próxima a velocidade calculada analiticamente que foi de 43,38 km/h.

Na tabela 8 é apresentado os deslocamentos do centro do vão da viga nos casos estático, pseudo-estático e dinâmico:

Tabela 8: Deslocamentos máximos no centro da viga

Deslocamentos		
Estático	Pseudo-estático	Dinâmico
(mm)	(mm)	(mm)
3,315	4,564	3,31

Fonte: Autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho, através da equação da linha elástica e com a rotina computacional e modelo de veículo ferroviário elaborados por Beghetto (2006), obteve-se analiticamente e numericamente os valores dos deslocamentos no centro dos vãos das vigas assim como as velocidades ressonantes para a ponte situada no km 126+900 da Ferrovia do Xisto, na cidade de Curitiba, Paraná.

O modelo de veículo ferroviário utilizado neste trabalho foi desenvolvido contendo nove graus de liberdade. Através do deslocamento das suspensões primárias e secundárias, provocadas por irregularidades da via férrea e representadas por funções harmônicas, foram obtidas as forças que são transmitidas para a ponte. Tal força é equivalente ao peso próprio do veículo e os esforços inerciais da locomotiva.

Para se realizar os cálculos dos esforços transmitidos para a ponte, foi considerado que as rodas da locomotiva e os trilhos da via são indeformáveis. Também foi considerado que ocorre a transferência do carregamento do veículo para a superestrutura pontualmente. Com a definição dos esforços transmitidos para a ponte foi possível analisar o deslocamento central da viga.

Os deslocamentos do centro do vão da viga foram estudados em 3 casos diferentes, sendo eles: Estático, Pseudo-Estático e Dinâmico.

Na análise estática, o deslocamento vertical do centro da viga foi obtido através da utilização de um caso particular da equação da linha elástica, que leva em consideração duas cargas concentradas distanciadas igualmente dos apoios, e foi equivalente a 3,315 milímetros.

Já na análise pseudo-estática, o deslocamento calculado foi de 4,564 mm; este valor foi maior devido a multiplicação da carga estática por um coeficiente de impacto equivalente a 1,377.

Por fim, na análise dinâmica a estrutura da ponte foi modelada com elementos finitos de viga e foi considerado o sistema como amortecido. A razão de amortecimento, que é estimado em função do tipo da estrutura, foi adotado como sendo 0,025. Obteve-se um deslocamento máximo de 3,31 mm e uma velocidade ressonante de 44 km/h; muito próxima a velocidade ressonante calculada analiticamente que foi de 43,38 km/h. Foi observado que próximo à velocidade ressonante ocorreu o fenômeno de batimento; isto ocorre quando existe a superposição de ondas de mesma amplitude, mesma direção e frequências próximas.

Conclui-se neste trabalho que o deslocamento dinâmico da estrutura foi menor que os deslocamentos estático e pseudo-estático devido a parcela referente a inércia das massas das rodas do veículo. Também é possível afirmar que as condições mais favoráveis de tráfego para a locomotiva e para a ponte ferroviária deste estudo de caso, de acordo com os modelos desenvolvidos por Beghetto (2006), se encontram entre as faixas de velocidade 20 à 31 km/h e 52 à 97km/h (onde os deslocamentos da viga não ultrapassam 1 mm).

6.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros seguindo a linha de pesquisa deste trabalho:

- Modelagem dos dormentes como sistema massa-mola-amortecedor;
- Verificar a influência do amortecimento estrutural nas respostas dinâmicas de deslocamento, velocidade e aceleração;
- Comparar as respostas dinâmicas com a utilização do trem tipo da norma;
- Realizar o acoplamento entre veículo para a modelagem da composição ferroviária.
- Realizar a modelagem das barras de contraventamentos junto à presente modelagem.
- Diante da situação dinâmica de carregamento, analisar os componentes e tensões atuantes na ponte.
- Considerar as solicitações causadas pelo vento, assim como a aceleração e frenagem do veículo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, F. S. C. de; KRAMAR, W. F. Análise do comportamento estrutural de uma ponte ferroviária de concreto armado submetida a esforços de natureza dinâmica. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso 2 (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

AGENCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT), <http://www.antt.gov.br/>. Acesso em: 20 jun. 2016.

ASSUNÇÃO, Tânia Maria Ribeiro Costa. *Considerações sobre efeitos dinâmicos e carregamentos induzidos por fontes de excitação em estruturas industriais* (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Pós Graduação em Engenharia de Estruturas – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2009.

BEGHETTO, F. L. M. *Efeitos dinâmicos em modelo de veículo e ponte ferroviária diante da variação de velocidade e irregularidades verticais da via* (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Pontifício Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Paraná, 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, 268f. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2011.

BRAGA, CARLOS – *International Institute for Management Development (IMD)* - <http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,infraestrutura-do-brasil-e-inferior-a-media-mundial,1555986>, 2014. Acesso em: 20 jun. 2016.

CARVALHO, J. C de, INSTITUTO DE ECONOMIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ)-<http://www.meionews.com.br/index.php/noticias/18-economia/2493- crise-mundial-economista-recomenda-aumento-de-investimentos-em-infraestrutura.html>. Acesso em: 20 jun. 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (CNT),

http://www.cnt.org.br/Paginas/Boletins_Detalhes.aspx?b=3. Acesso em: 20 jun. 2016.

CORREA, W. da. L. *Vibrações em pontes ferroviárias*, 107 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT),

<http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>. Acesso em: 20 jun. 2016.

DELGADO, R. L.; SANTOS, R. C. S. M. dos. *Modeling of railway bridge-vehicle interaction on high speed tracks*. *Computers and Structures*, vol. 63, p.511, Great Britain, 1997.

FRÝBA, L. A rough assessment of railway bridges for high speed trains, *Engineering Structures*, vol. 23, p. 548, Great Britain, 2001.

HALLACK, J. C; LEMONGE, A. C. C; BARBOSA, F. S; HALLAK, P. H. H. *Apostila de Resistência dos Materiais I*. Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional, p. 179, 2015.

KÜSTER, L. D.; SARTORI, A. L. Análise dinâmica de estruturas de concreto: Avaliação de três sistemas construtivos de lajes. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n.18, p. 13-22, 2011.

LAW, S. S. et al. Vehicle axle loads identification using finite element method. *Engineering Structures*, vol. 26, p. 1143, Great Britain, 2004.

LOG-IN LOGÍSTICA INTERMODAL, <https://www.loginlogistica.com.br/>. Acesso em: 20 jun. 2016.

MICHALTSOS, G. T. Parameters affecting the dynamic response of light (steel) bridges. *The Scientific Journal FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics*, vol. 2, p. 1203, Greece, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e protendido: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES (PNLT), <http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/pnlt.html>. Acesso em: 20 jun. 2016.

SONG, M. -K.; NOH, H. -C.; CHOI, C. -K. A new three-dimensional finite element analysis model of high-speed train-bridge interactions. *Engineering Structures*, vol. 25, p. 1611, Great Britain, 2003.

SOPHIANOPOULOS, D. S.; MICHALTSOS, G. T. Combined torsional-lateral vibration of beams under vehicular loading. I: Formulation and solution techniques. *The Scientific Journal FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics*, vol. 2, p. 877, Greece, 1999.

VIRGIN, L. N.; LYMAN, T. C. *Structural Dynamics of a Frame Including Axial Load Effects*. Dynamics of Civil Structures, vol. 4, p. 119, 2010.

Viação Férrea Centro-Oeste, VFCO (2016) - <http://vfco.brazilia.jor.br/>. Acesso em: 20 jun. 2016.

YANG, Y. -B.; YAU, J. -D.; HSU, L. -C. Vibration of simple beams due to trains moving at high speeds. *Engineering Structures*, v. 19, p. 936, Great Britain, 1997.

ANEXOS

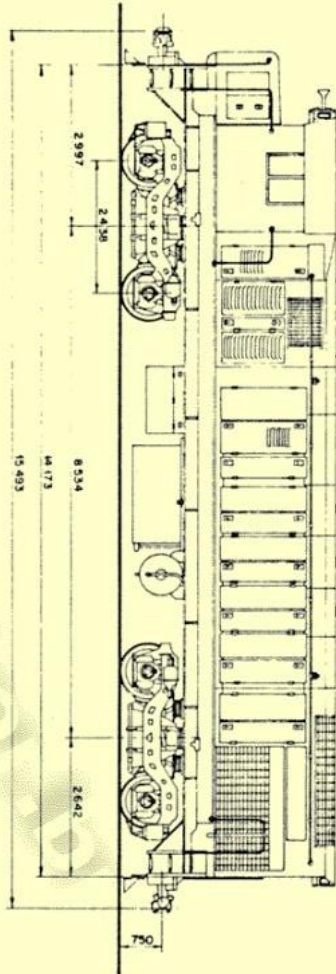
LOCOMOTIVA DIESEL-ELETRICA G22U

RFFSA-SR6

CARACTERISTICAS DE LOCOMOTIVAS

G22U/B-B

9



DADOS GERAIS

FABRICANTE: MACOSA (ESPAÑA) L.L.C. GM - EMD

ANO DE FABRICAÇÃO: 1973

ANO DO INICIO DE TRAFEGO: 1974

QUANTIDADE DE LOC.: 10

NUMERO (RFFSA): 1577 a 1586

NUMERO (FABR): 712282 a 712291

MODELO: G 22 U

POTENCIA BRUTA: 1.650 HP

POTENCIA DISPONIVEL P/TRACAO: 75.000 kg

PESO TOTAL (ABASTECIDA): 48.750 kg

PESO POR EIXO (ABASTECIDA): 12.500 kg

ESFORCO DE TRACAO MAX: 12.500 kg

ESFORCO DE TRACAO CONT: 97 km/h

VELOCIDADE MAX: 217 km/h

VELOCIDADE MIN: 26 L

TIPO DE EQUIP FREIO: SIM

FREIO DINAMICO: 59,82m

RADIO MIN. INCHICADO: 4.000L

TIPO DE TRANSMISSAO: DIESEL ELETRICA

CAP TANQUE DE OLEO DIESEL: 625L

CAP OLEO LAMPIN (CARTER): 68L

CAP. CIRCUNDAVA REFRIGERAÇÃO: TIPO E

EMATEES: MS-498-50

AP. CHOQUE TRACAO: MS-498-50

DADOS DOS TRUQUES

CLASSE: 0440L B-B

DIST. RODAS MOTORAS: 40" TIPO: A-40

DIST. RODAS LIVRES: --- TIPO: ---

MANEJA DOS EIXOS: 6 1/2 x 1 1/2

TIPO DE MANCAIS: CARTILHADO F

RELAÇÃO DE ENRIENAGENS: 63/14

CAP DOS ANELOS: 0,24m

CL. DE FREIO: 4 (9' x 8')

DADOS DO MOTOR DIESEL

FABRICANTE: GM (USA)

Nº DE CATALOGO: B.381612

MODELO: 645 E

Nº DE CILINDROS: 45° "V"

DESENGALO DOS CL.: 9 1/8" (230,2 mm)

DIAMETRO DOS CL.: 10" (254 mm)

CUNHO DOS EMBOLOS: ---

REJANE MAX: 900 RPM

MARCA EM VAZIO: 315 RPM

POTENCIA MAX: 1650 HP

PRINCIPAL DE FUNC: SOPRADORES "HOOTS"

LUBRIFICACAO: AGUA

REFRIGERACAO: UNITARIA

DADOS DO GERADOR PRINCIPAL

FABRICANTE: CENWESA (ESPAÑA)

Nº DE CATALOGO: B.386.335

MODELO: D-32-T

TENSÃO NOMINAL (CCI): 600 V

TENSÃO MAXIMA: 2.400 A

DADOS DO GERADOR AUXILIAR

FABRICANTE: GM (USA) MOO

Nº DE CATALOGO: A.715925

MODELO: 5.553.414

TENSÃO NOMINAL (CCI): 74 V

POTENCIA: 10 KW

DADOS DO MOTOR DE TRACAO

FABRICANTE: WIPAC (ESPAÑA)

Nº DE CATALOGO: 8.242.157

MODELO: D-22

TIPO: C.C

INTENSIDADE MAX: 450 A

QUANTIDADE POR LOC: 4

DADOS DO COMPRESSOR

FABRICANTE: GARONDE DENVER (USA)

Nº DE CATALOGO: B.434.342

MODELO: WBO

TIPO: 8103 (3 CL)

CAPACIDADE: 6,65 m³/min (234 CFM)

SIST. REFRIGERAÇÃO: AGUA

DADOS DOS ACUMULADORES

FABRICANTE: NIFE (BRASIL)

TIPO: ALCALINO

MODELO: 2 RL-220

TENSÃO: 64 V

CAPACIDADE: 220 Ah

OBSERVAÇÕES

DET. Nº: A4-1679/80

DESENHISTA: dego Bencabete

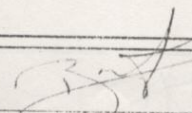
VISTO: M. F. de S. MOP 6

DATA: 01/12/80

ESCALA: SOM 2

9

PROJETO PONTE km 126+900 (PARTE I)

RFFSA		CADASTRO DE OBRA DE ARTE		
km	126+900	LINHA	LNH-LEB	Nº REF. 006
SR 5	SP 5	TRECHO Pinhais - Engº Bley		107/92.
RECUPERAÇÕES E REFORÇOS		VÃO Nº 1 e 2 ENCONTRO LADO		
<p>DESCRIÇÃO - (Descrever os serviços indicando a data da execução, especificando os materiais, se necessário desenhar esquemas e anexar projeto quando o mesmo existir. No caso de pintura, especificar a tinta e o nº de demão aplicado.)</p> <p>Executado no mes de maio/92 - a recuperação e pintura da ponte do km 126+900 do trecho Pinhais - Engº Bley.</p> <p>Tinta especificada</p> <p>base - 2 demão de Prinner zarcão 200 da Renner</p> <p>Acabamento - 2 demão de tinta alquídica da Renner 34141 na cor alumínio</p>				
 Responsável				

PROJETO PONTE km 126+900 (PARTE II)

	CADASTRO DE OBRA DE ARTE			1
	KM 126 + 900	LINHA LNH-LED	Nº REF. 06	10
1	SR 5	SP5	TRECHO Pinhais - Engº Bley	COD. TRECHO
	OBRA Rio Barigui		CONST. 19	REFORMA 19
	PROJETO	COMPLETO <input type="checkbox"/>	PARCIAL <input type="checkbox"/>	GEOMÉTRICO <input type="checkbox"/>
	DATA	20/03/81	HORA 15:45h	TEMPO 45 min
	ENGº RESP.	<i>R. Peres</i>	ENGº FISCAL	<i>Raul J. de L.</i>
2	BITOLA 1,00m Nº VIAS 1	ESTRADO SUP. <input type="checkbox"/>	ESTRADO MED. <input type="checkbox"/>	ESTRADO INF. <input type="checkbox"/>
	RAMPA S	CURVA N	ESCONDIDADE S	
	LASTRO N	CONTRA - TRILHO S		
	DORMENTES	COMUM <input type="checkbox"/>	ESPECIAL <input checked="" type="checkbox"/>	Nº A SUBST. -
	PASSEIO N	REFÚGIO		
3	Nº DE VÃOS 2	EXTREMOS:	ENCONTRO <input checked="" type="checkbox"/>	BALANÇO <input type="checkbox"/>
	TIPO ESTRUTURAL:	VIGA SIMPLES <input checked="" type="checkbox"/>	VIGA CONTÍNUA <input type="checkbox"/>	PORTICO <input type="checkbox"/>
		ARCO <input type="checkbox"/>	VIGA ARMADA <input type="checkbox"/>	TRELIÇA <input type="checkbox"/>
4	ESQUEMA GERAL. Cotar vãos entre apoios (m). Indicar lados, numerar pilares e vãos no sentido KM			
	PINHAIS		ENGº BLEY	
5	ENCONTROS	LADO PINHAIS	LADO ENGº BLEY	
	MATERIAL	Concreto Armado	Concreto Armado	
	COMPR. L, ALTURA H (m)	L = 11,80m H = 10,80m	L = 11,80m H = 8,90m	
	PRUMO, ALINH.	B	B	
	RECALQUES	N	N	
	DRENAGEM	S	S	
	FISSURAS, ABERT. JUNTAS	N	N	
	CORROSÃO, DETER.	N	N	
	FUNDAÇÃO	ESTACA	ESTACA	
6	PILARES	MACIÇO <input checked="" type="checkbox"/>	PÓRTICO <input type="checkbox"/>	TORRE <input type="checkbox"/>
	MATERIAL:	CONCRETO <input checked="" type="checkbox"/>	ALV. PEDRA <input type="checkbox"/>	MADEIRA <input type="checkbox"/>
	FUNDAÇÃO:	DIRETA <input type="checkbox"/>	ESTACA <input checked="" type="checkbox"/>	TUBULÃO <input type="checkbox"/>
	ESTADO DE CONSERVAÇÃO		Nº DOS PILARES AFETADOS	
	FORA DE PRUMO OU ALINHAMENTO	<input type="checkbox"/>	_____	
	RECALQUE	<input type="checkbox"/>	_____	
	DRENAGEM DEFICIENTE	<input type="checkbox"/>	_____	
	FISSURAS	<input type="checkbox"/>	_____	
	ARMADURAS APARENTES	<input type="checkbox"/>	_____	
	CORROSÃO: FORTE <input type="checkbox"/> MÉDIA <input type="checkbox"/> SUPERF. <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____	
	SOLAPAMENTO NAS FUNDAÇÕES	<input type="checkbox"/>	_____	
	OUTROS DEFEITOS NAS FUNDAÇÕES	<input type="checkbox"/>	_____	
	DETERIORAÇÃO NOS BLOCOS FUND.	<input type="checkbox"/>	_____	
7	APARELHOS DE APOIO	RÓTULA <input checked="" type="checkbox"/>	ATRITO <input type="checkbox"/>	MADEIRA <input type="checkbox"/>
	FIXOS:	ROLETE <input type="checkbox"/>	PENDULO <input checked="" type="checkbox"/>	NEOPRENE <input type="checkbox"/>
	MÓVEIS:			NÃO <input type="checkbox"/>
	ESTADO DE CONSERVAÇÃO	APARELHO AFET. (Nº PILAR OU ENCONTRO)		
	FORA DE POSIÇÃO	<input type="checkbox"/>	_____	
	DRENAGEM DEFICIENTE	<input type="checkbox"/>	_____	
	SUJEIRA E DETRITOS	<input checked="" type="checkbox"/>	E2	
	CORROSÃO: FORTE <input type="checkbox"/> MÉDIA <input type="checkbox"/> SUPERF. <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____	

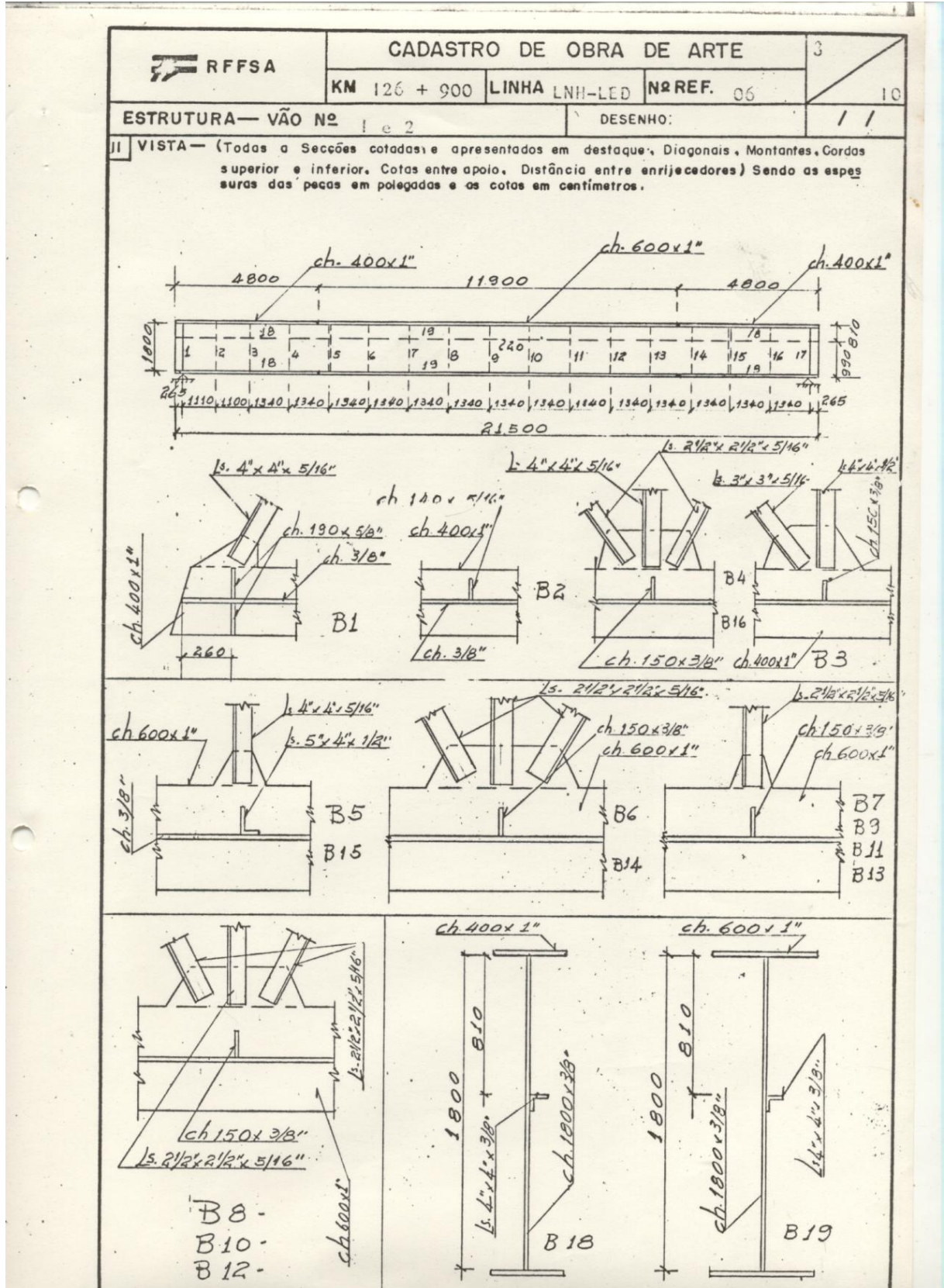
CH = CHUVOSO
 NU = NUBLADO
 R = RUIM
 B = BOM
 N = NÃO
 S = SIM
 TOTALMENTE NA OBRA . CONFERIR NA OBRA .

PROJETO PONTE km 126+900 (PARTE III)

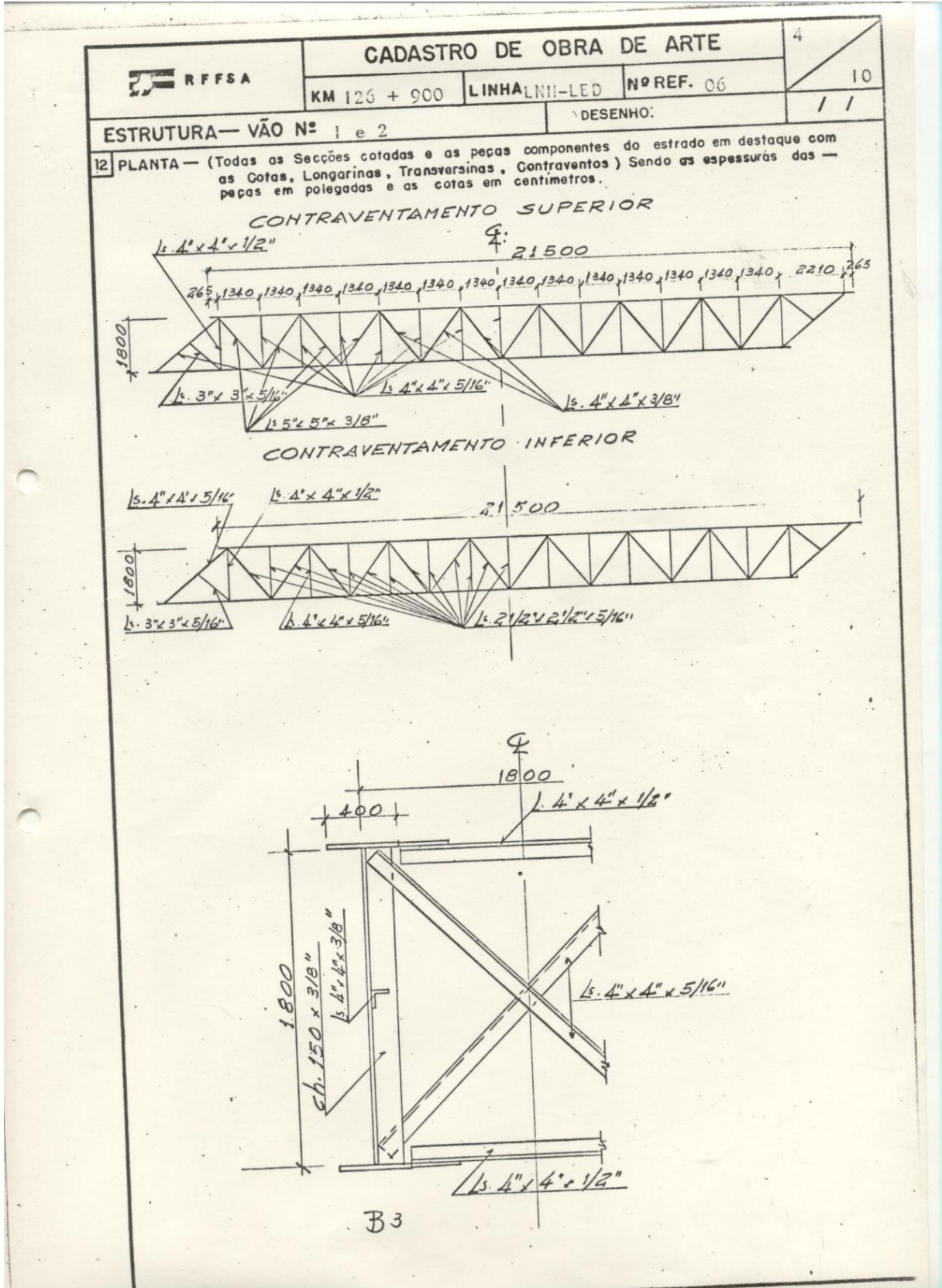
RFFSA		CADASTRO DE OBRA DE ARTE			2	
		KM	LINHA	Nº REF.	10	
		126 + 900	LNH-LED	06		
VIGAMENTO PRINCIPAL		VÃO Nº 1 e 2				
8	ANO DE FABRICAÇÃO 19	EXTENSÃO SOBRE VIGAMENTOS			21,50 m	
TIPO:		VIGA I <input checked="" type="checkbox"/>	VIGA T <input type="checkbox"/>	VIGA RET. <input type="checkbox"/>		
		CAIXÃO <input type="checkbox"/>	VIGA ARM. <input type="checkbox"/>	TRELIÇA <input type="checkbox"/>		
MATERIAL:		AÇO <input checked="" type="checkbox"/>	MADEIRA <input type="checkbox"/>	C. ARMADO <input type="checkbox"/>	C. PROTENDIDO <input type="checkbox"/>	
CONTRAVENTAMENTO HORIZONTAL SUPERIOR		<input checked="" type="checkbox"/>		INTERMED. <input type="checkbox"/>	INFERIOR <input checked="" type="checkbox"/>	
LIGAÇÕES		REBITE <input checked="" type="checkbox"/>		PARAFUSO <input type="checkbox"/>	SOLDA <input checked="" type="checkbox"/>	
PINTURA DATA 19		BOA <input checked="" type="checkbox"/>		RUIM <input type="checkbox"/>	NÃO <input type="checkbox"/>	
DEFORMAÇÃO N		ALINHAMENTO B				
FISSURAS N		ARMADURAS APARENTES				
9	CORROSÃO, DETER.	FORTE	MÉDIA	SUPERF.	NÃO	PARTES AFETADAS % AFETADA
FLANGE OU BANZO SUP.					-	
FLANGE OU BANZO INF.					-	
ALMA OU DIAGONAIS					-	
MONTANTE					-	
CONTRAVENTAMENTO					-	
REBITES					-	
10	CARGA MÓVEL	FLECHA		GRANDE <input type="checkbox"/>	IMPERCEPT <input checked="" type="checkbox"/>	
		VIBR. LAT.		GRANDE <input type="checkbox"/>	IMPERCEPT <input checked="" type="checkbox"/>	
OBSERVAÇÕES						
ESTRADO NÃO INF <input type="checkbox"/> MED <input type="checkbox"/> SUP <input type="checkbox"/>						
LONGARINA		VÃO (EXT)				
TIPO DE PERFIL		COMPOSTO		LAMINADO		
MATERIAL		AÇO <input type="checkbox"/>	MAD. <input type="checkbox"/>	CONC. A <input type="checkbox"/>	CONC. P <input type="checkbox"/>	MISTA <input type="checkbox"/> TRILHO <input type="checkbox"/>
LIGAÇÃO		SOLDA <input type="checkbox"/>	REB. <input type="checkbox"/>	PARAF. C <input type="checkbox"/>	PARAF. ALTA. REST. <input type="checkbox"/>	MISTA <input type="checkbox"/>
ESTADO						
PINTURA		BOA <input type="checkbox"/>	RUIM <input type="checkbox"/>	NÃO <input type="checkbox"/>		
CORROSÃO		FORTE <input type="checkbox"/>	MED. <input type="checkbox"/>	SUPERF. <input type="checkbox"/>	PARTE AFETADA..... % AFETADO	
FISSURA		SIM <input type="checkbox"/>	NÃO <input type="checkbox"/>			
TRANSVERSINAS.		VÃO (DIST. V.P)		DIST. ENT. LONGARINAS		
CONTRAVENTAMENTO		HORIZONTAL <input type="checkbox"/>		VERTICAL <input type="checkbox"/>		
TIPO DE PERFIL		COMPOSTO <input type="checkbox"/>		LAMINADO <input type="checkbox"/>		
MATERIAL		AÇO <input type="checkbox"/>	MAD. <input type="checkbox"/>	CONC. A <input type="checkbox"/>	CONC. P <input type="checkbox"/>	MISTA <input type="checkbox"/> TRILHO <input type="checkbox"/>
LIGAÇÃO		SOLDA <input type="checkbox"/>	REB. <input type="checkbox"/>	PARAF. C <input type="checkbox"/>	PARAF. ALTA. REST. <input type="checkbox"/>	MISTA <input type="checkbox"/>
ESTADO						
PINTURA		BOA <input type="checkbox"/>	RUIM <input type="checkbox"/>	NÃO <input type="checkbox"/>		
CORROSÃO		FORTE <input type="checkbox"/>	MED. <input type="checkbox"/>	SUPER. <input type="checkbox"/>	PARTE AFETADA..... % AFETADO	
FISSURA		SIM <input type="checkbox"/>	NÃO <input type="checkbox"/>			

PREENCHER TOTALMENTE NA OBRA. CONFERIR NA OBRA.

PROJETO PONTE km 126+900 (PARTE IV)



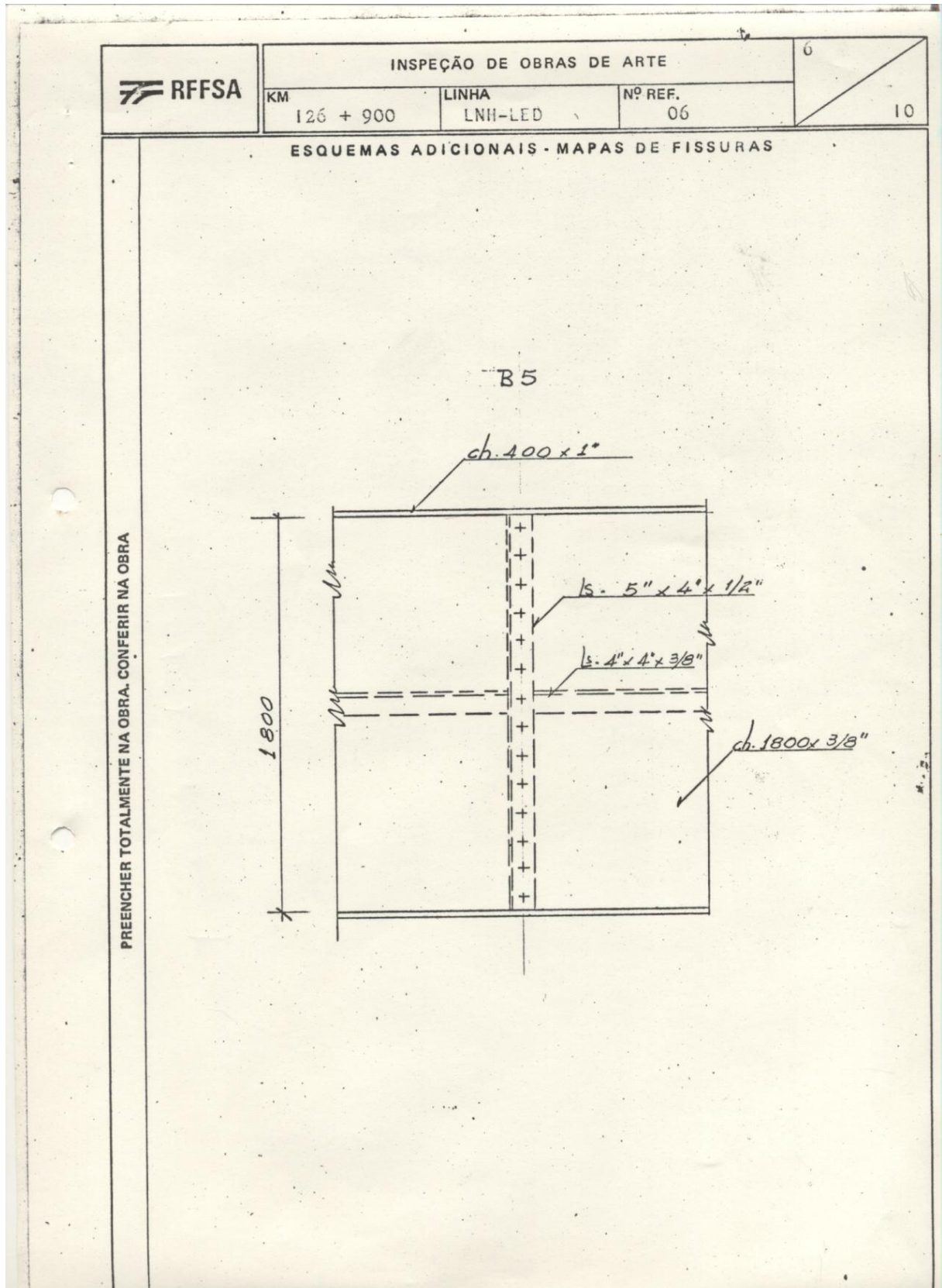
PROJETO PONTE km 126+900 (PARTE V)




PROJETO PONTE km 126+900 (PARTE VI)

	CADASTRO DE OBRA DE ARTE			5	
	KM 126 + 900	LINHA LNH-LED	Nº REF. 06	10	
ESTRUTURA - VÃO Nº 1 e 2			DESENHO:		
SEÇÕES TRANSVERSAIS COTADAS (Cotas em milímetros)					
PREENCHER TOTALMENTE NA OBRA. CONFERIR NA OBRA. UMA FOLHA PARA CADA VÃO DESIGUAL.	<p>13 SEÇÃO TRANSVERSAL PONTE, CONTRAVENTAMENTOS.. Cotas: c.c. vigas; larg., altura, gabarito.</p>	<p>14 VIGA 1/2 VÃO. Cotas: Altura total chapas, espss. mesa (t_p), espess. alma (t_a).</p>			
	15 1/4 DO VÃO				
	<p>16 VIGA NO APOIO (Alma cheia) Espessura de alma, enrijecedor de apoio, compr. de apoio.</p>	<p>17 APARELHOS DE APOIO MÓVEIS (Posição dos roletes ou pêndulo, folgas verticais nos apoios, folga entre viga e encontro).</p>			

PROJETO PONTE km 126+900 (PARTE VII)



PROJETO PONTE km 126+900 (PARTE VIII)

RFFSA	CADASTRO DE OBRA DE ARTE			7
	KM	LINHA	Nº REF.	
	126 + 900	LNH-LED	06	10
FOLHA DE CLASSIFICAÇÃO DE CAMPO			VÃO Nº 1 e 2	
SUPERESTRUTURA				
			LONG.	TRANS. V.P.
I – Peças com redução de seção \geq 50% devido a corrosão	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
II – Peças com redução de seção \geq 25%, e $<$ 50%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
III – Peças com redução de seção $<$ 25%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I – Elementos de ligação (parafusos, solda, rebite, etc...) soltos ou inexistentes em quantidade $>$ 30% em cada ligação.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
II – Elementos de ligação (parafusos, solda, rebite, etc...) soltos ou inexistentes em quantidade \geq 10% ou \leq 30% em cada ligação.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
III – Elementos de ligação (parafusos, solda, rebite, etc...) soltos ou inexistentes em quantidade $<$ 10% em cada ligação.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I – Fraturas (fissuras muito perigosas)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
II – Fendas (fissuras perigosas)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I – Peças com grandes deformações (devido a acidente ou outros fatores)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
II – Peças com pequenas deformações (devido a acidente ou outros fatores)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I – Armaduras aparentes com redução de seção no aço (estruturas de concreto armado ou protendido)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
II – Armaduras aparentes sem redução de seção no aço (estruturas de concreto armado ou protendido)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I – Deterioração forte (peça de madeira)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
II – Deterioração média (peça de madeira)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
III – Deterioração leve superficial (peças de madeira)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outras condições de risco (especificar)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ϕ – Bom Estado (não apresenta nenhum item acima)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MESOESTRUTURA				
			ENCONTRO	PILAR
I – Fraturas (fissuras muito perigosas)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
II – Fendas (fissuras perigosas)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
III – Acentuado desalinhamento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outras condições de risco (especificar)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ϕ – Bom Estado (não apresenta nenhum item acima)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
 Eng.º Responsável pela classificação				