



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS – EM  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - DECIV  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. CIVIL – PROPEC



**REAVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DAS PONTES FERROVIÁRIAS DO TRECHO  
OURO PRETO-MARIANA – VISÃO DOS PROBLEMAS PATOLÓGICOS E  
ESTUDO DE CASO DA PONTE DA ESTAÇÃO DE OURO PRETO**

MESTRANDO: Wagner Cavallare de Souza

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Prof. Dr. Luiz Cláudio Cândido

Ouro Preto, agosto de 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS – EM  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - DECIV  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. CIVIL – PROPEC



**REAVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DAS PONTES FERROVIÁRIAS DO TRECHO  
OURO PRETO-MARIANA – VISÃO DOS PROBLEMAS PATOLÓGICOS E  
ESTUDO DE CASO DA PONTE DA ESTAÇÃO DE OURO PRETO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

MESTRANDO: Wagner Cavallare de Souza

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Prof. Dr. Luiz Cláudio Cândido

Ouro Preto, agosto de 2015

C376r

Cavalare de Souza, Wagner.

Reavaliação da integridade das pontes ferroviárias do trecho Ouro Preto-Mariana [manuscrito]: visão dos problemas patológicos e estudo de caso da ponte da Estação de Ouro Preto / Wagner Cavalare de Souza. - 2015.

137f.: il.: color; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas.

Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Cândido Luiz.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Pontes metálicas. 2. Patologia. 3. Análise elástica (Engenharia). 4. Pontes ferroviárias. 5. Corrosão. I. Freitas, Marcílio Sousa da Rocha. II. Luiz, Cláudio Cândido. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.21(815.1)

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)

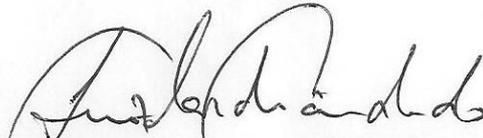
**REAVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DAS PONTES FERROVIÁRIAS DO TRECHO  
OURO PRETO-MARIANA: VISÃO DOS PROBLEMAS PATOLÓGICOS E ESTUDO  
DE CASO DA PONTE DA ESTAÇÃO DE OURO PRETO**

**AUTOR: WAGNER CAVALARE DE SOUZA**

Esta tese foi apresentada em sessão pública e aprovada em 24 de agosto de 2015,  
pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas (Orientador/UFOP)



Prof. Dr. Prof. Dr. Luiz Cláudio Cândido – UFOP (Co-orientador)



Prof. Dr. Henor Artur de Souza (UFOP)



Prof. Dra. Mônica Maria de Abreu Mendonça Schwartzman – CDTN/CNEN

# Agradecimentos

Ao Criador, pela sua grandeza e generosidade.

Aos meus pais e família pelo apoio incondicional nesses anos de caminhada.

Agradeço a meus orientadores Prof. Luiz Cláudio Cândido e Prof. Marcílio Sousa da Rocha Freitas pelo trabalho realizado, e principalmente, pelo respeito e amizade.

Aos amigos do PROPEC pelas horas de estudo e pelo conhecimento compartilhado.

À FCA/VLi , à Escola de Minas – UFOP, a CAPES, pelo apoio prestado.

Pessoas que merecem destaque, cada um pelo seu apoio singular prestado são meus nobres amigos Gustavo Brandão, Maicon José, Rogério Ferreira, Francisco Anunciação e o Eng. Nilvando Alves Rocha.

Por fim, e não menos importante, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que este dia fosse possível.

## Resumo

Sabe-se que a deterioração ocorrida em estruturas de pontes metálicas é um problema de escala mundial. As principais razões para esta ocorrência são: o envelhecimento de sua estrutura, aumento da carga de tráfego, ataque ambiental provocado principalmente pelas intempéries e também projetos, detalhamento e construção da estrutura inadequados. Logo, foi proposto uma reavaliação da integridade das pontes ferroviárias em estrutura metálica do trecho entre as cidades históricas de Ouro Preto e Mariana/MG abordando as principais causas, possibilidades de prevenção e correção das patologias encontradas. O espaço temporal adotado compreende desde a última manutenção realizada em 2005/2006 até a situação atual do trecho ferroviário. Na ocasião houve, juntamente com a parte prática de reforma e manutenção das pontes metálicas do trecho, uma pesquisa de cunho acadêmico originando uma dissertação de mestrado abordando os aspectos estruturais e patológicos dessas estruturas. Fez-se ainda um estudo de caso focado na Ponte da Estação de Ouro Preto onde é realizada uma avaliação numérica no *software* SAP 2000 além de análises e ensaios laboratoriais com o intuito de se atestar a integridade estrutural da ponte. A avaliação nas esferas das patologias dos materiais metálicos e do cálculo estrutural de pontes metálicas permite uma visão global da integridade do conjunto em estudo.

# **Abstract**

It is known that the deterioration occurred in structures of steel bridges is a worldwide problem. The main reasons for this are: the ageing of its structure, increase of traffic load, environmental attack caused mainly by weather and also designs, detailing and construction of inappropriate structure. Soon, propose a reassessment of the integrity of the railway bridges in the metallic structure of the stretch between the historic cities of Ouro Preto and Mariana, Minas Gerais, addressing the main causes, possibilities for prevention and correction of diseases found. The timeline includes adopted since the last maintenance performed in 2005/2006 to the current situation of the railroad. At the time there was, along with the practice of reform and maintenance of steel bridges, a snippet of an academic research resulting in a master's thesis addressing structural and pathological aspects of these structures. We propose also a focused case study in Ouro Preto Station Bridge where it will be a numerical assessment appropriate software as well as analysis and laboratory testing in order to certify the structural integrity. The evaluation of the conditions in the spheres of metallic materials and structural design of steel bridges allows an overview of the whole study integrity.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Aspectos Históricos e Culturais</b> .....	<b>20</b>
2.1.1	Breve histórico das pontes .....	20
2.1.2	Breve histórico das ferrovias .....	21
2.1.3	Histórico do trecho ferroviário – Ouro Preto / Mariana .....	23
<b>2.2</b>	<b>Sistemas estruturais para pontes</b> .....	<b>24</b>
2.2.1	Pontes em arco .....	25
2.2.2	Pontes em vigas .....	26
2.2.3	Pontes suspensas .....	28
<b>2.3</b>	<b>Materiais Utilizados em Pontes</b> .....	<b>29</b>
2.3.1	Fundamentos de ferros fundidos .....	30
2.3.1.1	<i>Ferro Fundido Branco</i> .....	31
2.3.1.2	<i>Ferro Fundido Cinzento</i> .....	31
2.3.1.3	<i>Ferro Fundido Maleável</i> .....	32
2.3.1.4	<i>Ferro Fundido Nodular</i> .....	32
2.3.2	Fundamentos de aços .....	33
<b>2.4</b>	<b>Patologias em Pontes</b> .....	<b>35</b>
2.4.1	O fenômeno de corrosão .....	35
2.4.1.1	<i>Corrosão uniforme</i> .....	38
2.4.1.2	<i>Corrosão por pite</i> .....	39
2.4.1.3	<i>Corrosão por frestas</i> .....	40
2.4.1.4	<i>Corrosão galvânica</i> .....	41

2.4.2	O fenômeno da fadiga.....	42
2.4.3	Patologias em ligações.....	45
<b>2.5</b>	<b>Estudo da Modelagem Estrutural de Pontes Metálicas .....</b>	<b>47</b>
2.5.1	Avaliação Estrutural – Prova de Carga.....	47
2.5.2	Avaliação Estrutural – Método Numérico .....	49
<b>2.6</b>	<b>Estudo da Metodologia de Inspeção.....</b>	<b>50</b>
2.6.1	Inspeção Cadastral .....	51
2.6.2	Inspeção Especial.....	51
2.6.3	Do planejamento à execução das inspeções em pontes metálicas .....	52
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>56</b>
<b>3.1</b>	<b>Análises e Ensaio Laboratoriais e <i>in loco</i> .....</b>	<b>56</b>
3.1.1	Propriedades mecânicas dos metais.....	56
3.1.2	Composição química do material .....	56
3.1.3	Análise metalográfica .....	57
3.1.4	Ensaio de dureza .....	59
3.1.5	Ensaio de tração .....	60
3.1.6	Difração de raios X.....	62
<b>3.2</b>	<b>Análise Estrutural da Ponte da Estação de Ouro Preto.....</b>	<b>63</b>
3.2.1	Determinação das propriedades geométricas.....	63
3.2.2	Condições de Carregamento da Estrutura.....	68
3.2.2.1	<i>Combinação de cargas</i> .....	69
3.2.2.2	<i>Peso próprio da estrutura</i> .....	70
3.2.2.3	<i>Carga móvel em ponte ferroviária</i> .....	70
3.2.2.4	<i>Impacto vertical – efeito da ação dinâmica</i> .....	71
3.2.2.5	<i>Impacto lateral (Fh)</i> .....	72
3.2.2.6	<i>Força centrífuga (Fc)</i> .....	73

3.2.2.7	<i>Força longitudinal (Fl)</i> .....	73
3.2.2.8	<i>Ação do vento</i> .....	74
3.2.2.9	<i>Deslocamento da carga móvel</i> .....	75
3.2.3	Modelagem da “Ponte da Estação” no “software” SAP2000.....	77
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>78</b>
<b>4.1</b>	<b>Cadastro das O.A.E. da Ferrovia Turística Cultural</b> .....	<b>78</b>
<b>4.2</b>	<b>Inspeção das Pontes da Ferrovia Turística Cultural entre Ouro Preto e Mariana/MG</b> .....	<b>78</b>
4.2.1	Inspeção na PEOP (Ponte da Estação de Ouro Preto/MG – km 0,0).....	79
4.2.1.1	<i>Ficha de Inspeção Cadastral da PEOP</i> .....	79
4.2.1.2	<i>Detalhamento arquitetônico e estrutural da PEOP</i> .....	81
4.2.1.3	<i>Registro fotográfico da PEOP</i> .....	82
4.2.1.4	<i>Ficha de Inspeção Especial da PEOP</i> .....	84
4.2.2	Inspeção na PBOP (Ponte da Barra de Ouro Preto/MG – km 1,17).....	86
4.2.2.1	<i>Ficha de Inspeção Cadastral da PBOP</i> .....	86
4.2.2.2	<i>Detalhamento arquitetônico e estrutural da PBOP</i> .....	89
4.2.2.3	<i>Registro fotográfico da PBOP</i> .....	91
4.2.3	Inspeção no Pontilhão do km 5,65 (Ferrovia Ouro Preto – Mariana/MG).....	93
4.2.3.1	<i>Ficha de Inspeção Cadastral do “Pontilhão do km 5,65”</i> .....	93
4.2.3.2	<i>Detalhamento arquitetônico e estrutural do “Pontilhão do km 5,65” da Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”</i> .....	96
4.2.3.3	<i>Registro fotográfico do “Pontilhão do km 5,65”</i> .....	97
4.2.4	Inspeção no Pontilhão do km 11,30 (Ferrovia Ouro Preto – Mariana/MG).....	99
4.2.4.1	<i>Ficha de Inspeção Cadastral do “Pontilhão do km 11,30” da Ferrovia Ouro Preto – Mariana</i> .....	99
4.2.4.2	<i>Detalhamento arquitetônico e estrutural do “Pontilhão do km 11,30” da Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”</i> .....	102

4.2.4.3	<i>Registro fotográfico do “Pontilhão do km 11,30” da Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”</i> .....	103
4.2.5	Inspeção no Viaduto de Mariana – km 17,84 .....	104
4.2.5.1	<i>Ficha de Inspeção Cadastral do “Viaduto de Mariana/MG”</i> .....	105
4.2.5.2	<i>Detalhamento arquitetônico e estrutural do “Viaduto de Mariana/MG”</i> .....	107
4.2.5.3	<i>Registro fotográfico do “Viaduto de Mariana/MG”</i> .....	108
4.3	<b>Patologias nas O.A.E.s da Ferrovia Ouro Preto – Mariana/MG</b> .....	109
4.4	<b>Resultados da Análise Numérica</b> .....	116
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	123
6	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	125
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	126
	<b>ANEXOS</b> .....	130
	<b>ANEXO A – Ficha de Inspeção Cadastral</b> .....	130
	<b>ANEXO B – Ficha de Inspeção Periódica (Rotineira)</b> .....	133

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Primeira ponte totalmente em ferro fundido – “ <i>Ironbridge</i> ”, Inglaterra .....	21
Figura 2.2 - Ponte Mississippi, St. Louis, EUA.....	25
Figura 2.3 - Ponte “ <i>Sydney Harbour Bridge</i> ”, Sydney, Austrália .....	26
Figura 2.4 – “Ponte do Funil” Ouro Preto-MG, durante recuperação em 2005 .....	27
Figura 2.5 - Vão Central da Ponte Rio-Niterói, Rio de Janeiro, Brasil .....	27
Figura 2.6 - Ponte ferroviária de Portimão – Portugal .....	28
Figura 2.7 - Ponte 25 de Abril, Lisboa, Portugal .....	29
Figura 2.8 - Ponte Estação Santo Amaro, São Paulo, Brasil .....	29
Figura 2.9 - Ciclo energético dos metais .....	36
Figura 2.10 - Corrosão uniforme na Ponte da Estação de Ouro Preto – MG .....	39
Figura 2.11 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura de um pite em aço inoxidável .....	40
Figura 2.12 - Corrosão por fresta entre tubulação e perfil metálico suporte .....	41
Figura 2.13 - Típica corrosão galvânica entre o aço e o latão.....	42
Figura 2.14 Fratura por fadiga (detalhe das “ <i>marcas de praia</i> ” propagação estável da trinca) .....	44
Figura 2.15 - Ligação rebitada na Ponte da Estação de Ouro Preto .....	47
Figura 3.1 – Etapas de preparação da amostra para análise metalográfica .....	58
Figura 3.2 – Micrografia da amostra sem ataque; 100x .....	58
Figura 3.3 – Micrografia da amostra com ataque Nital 2%; 200x .....	58
Figura 3.4 – Micrografia da amostra com ataque Nital 2%; 400x .....	59
Figura 3.5 – Amostra após ensaio de dureza Brinell (setas nas indentações realizadas) .....	60
Figura 3.6 - Máquina de ensaios mecânicos – DEMET/UFOP .....	61
Figura 3.7 – Corpo de prova usado no ensaio de tração (NBR 6152/2002) .....	61
Figura 3.8 – Etapas para realização do ensaio de Raios X .....	63
Figura 3.9 - Levantamento da geometria dos elementos da Ponte da Estação .....	64
Figura 3.10 – Representação esquemática em vista frontal, localizando os elementos estruturais da Ponte da Estação .....	67
Figura 3.11 - Representação esquemática em vista superior, localizando os elementos estruturais da Ponte da Estação .....	67
Figura 3.12 - Representação esquemática em vista inferior, localizando os elementos estruturais da Ponte da Estação .....	68

Figura 3.13 - Representação esquemática da seção transversal típica, localizando os elementos estruturais da Ponte da Estação .....	68
Figura 3.14 - Características gerais do trem-tipo de ponte ferroviária .....	71
Figura 3.15 - Posicionamento da força devido ao impacto lateral .....	73
Figura 3.16 - Aplicação da ação do vento na estrutura da Ponte da Estação .....	75
Figura 3.17 – Pontos de aplicação do carregamento móvel .....	75
Figura 3.18 – Variação do posicionamento do trem-tipo ao longo da ponte .....	76
Figura 4.1 – Planta da “Ponte da Estação” .....	81
Figura 4.2 – Vista lateral da “Ponte da Estação” .....	81
Figura 4.3 – Seção transversal típica no meio do vão da “Ponte da Estação” .....	82
Figura 4.4 – Seção transversal típica na região dos apoios da “Ponte da Estação” .....	82
Figura 4.5 – Registro fotográfico da “Ponte da Estação de Ouro Preto/MG” (2014) .....	83
Figura 4.6 – Planta da “Ponte da Barra” (parte metálica) .....	89
Figura 4.7 – Planta do viaduto de acesso à PBOP (em concreto armado – sentido Ouro Preto/MG) .....	89
Figura 4.8 – Planta do viaduto de acesso à PBOP (em concreto armado – sentido Mariana/MG) .....	89
Figura 4.9 – Planta do atual viaduto de acesso à PBOP (em estrutura metálica) .....	90
Figura 4.10 – Vista lateral da “Ponte da Barra” (parte metálica) .....	90
Figura 4.11 – Seção transversal típica no meio do vão da PBOP .....	91
Figura 4.12 – Seção transversal típica nos viadutos de acesso da PBOP .....	91
Figura 4.13 – Registro fotográfico da “Ponte da Barra de Ouro Preto/MG” (2014) .....	92
Figura 4.14 – Planta do “Pontilhão do km 5,65” .....	96
Figura 4.15 – Vista longitudinal do “Pontilhão do km 5,65” .....	96
Figura 4.16 – Seção transversal típica no meio do vão do “Pontilhão do km 5,65” .....	97
Figura 4.17 – Seção transversal típica na região dos apoios do “Pontilhão do km 5,65” .....	97
Figura 4.18 – Registro fotográfico do “Pontilhão do km 5,65” (2014) .....	98
Figura 4.19 – Planta do “Pontilhão do km 11,30” .....	102
Figura 4.20 – Vista longitudinal do “Pontilhão do km 11,30” .....	102
Figura 4.21 – Seção transversal típica no meio do vão do “Pontilhão do km 11,30” .....	103
Figura 4.22 – Seção transversal típica na região dos apoios do “Pontilhão do km 11,30” .....	103
Figura 4.23 – Registro fotográfico do “Pontilhão do km 11,30” (2014) .....	104
Figura 4.24 – Planta do “Viaduto de Mariana/MG” .....	107

Figura 4.25 – Vista longitudinal do “Viaduto de Mariana/MG” .....	107
Figura 4.26 – Seção transversal típica no meio do vão do “Viaduto de Mariana/MG” .....	108
Figura 4.27 – Seção transversal típica na região dos apoios do “Viaduto de Mariana/MG” .....	108
Figura 4.28 – Registro fotográfico do “Viaduto de Mariana/MG” (2014) .....	109
Figura 4.29 - Corrosão na viga inferior e no aparelho de apoio fixo da “Ponte da Estação” .....	110
Figura 4.30 – Tubulação de água e degradação no aparelho de apoio móvel da “Ponte da Estação” .....	111
Figura 4.31 - Corrosão na passarela de pedestres da “Ponte da Estação de Ouro Preto” .....	112
Figura 4.32 – Ausência de elemento de ligação da “Ponte da Estação” .....	113
Figura 4.33 – Corrosão na viga inferior da “Ponte da Estação” .....	114
Figura 4.34 – Relatório de inspeção realizado pela empresa VLi em 2011 .....	115
Figura 4.35 – Deterioração do sistema de pintura da “Ponte da Estação de Ouro Preto” ....	116
Figura 4.36 – Elementos sujeitos a esforço normal na “Ponte da Estação de Ouro Preto” ..	117
Figura 4.37 – Elementos sujeitos a esforço cortante na “Ponte da Estação de Ouro Preto” ..	118
Figura 4.38 – Elementos sujeitos a momento fletor na “Ponte da Estação de Ouro Preto” ..	118

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Cronograma de implantação das principais ferrovias brasileiras .....	23
Tabela 2.2 - Principais características e aplicações dos aços carbono .....	34
Tabela 2.3 - Influências dos fatores meteorológicos na corrosão atmosférica .....	38
Tabela 3.1 – Composição química (% em massa) do aço analisado .....	57
Tabela 3.2 – Valores de dureza Brinell (HB), média e desvio padrão .....	60
Tabela 3.3 – Ensaio de tração em amostra do aço da PEOP .....	62
Tabela 3.4 – Propriedades geométricas dos perfis da Ponte da Estação .....	65
Tabela 3.5 – Valor das constantes apresentadas na Figura 4.14 .....	71
Tabela 3.6 – Valores do impacto lateral para as quatro categorias de trens-tipo .....	72
Tabela 3.7 – Valores da ação do vento para a “Ponte da Estação” .....	74
Tabela 4.1 – Ficha de Inspeção Cadastral da PEOP .....	80
Tabela 4.2 – Ficha de Inspeção Especial da PEOP .....	85
Tabela 4.3 – Ficha de Inspeção Cadastral da PBOP .....	87
Tabela 4.4 – Ficha de Inspeção Cadastral do “Pontilhão do km 5,65” .....	94
Tabela 4.5 – Ficha de Inspeção Cadastral do “Pontilhão do km 11,30” .....	100
Tabela 4.6 – Ficha de Inspeção Cadastral do “Viaduto de Mariana/MG” .....	105
Tabela 4.7 – Solicitações extremas no banzo superior da PEOP .....	119
Tabela 4.8 – Solicitações extremas no banzo inferior da PEOP .....	119
Tabela 4.9 – Solicitações extremas nas diagonais da PEOP .....	120
Tabela 4.10 – Solicitações extremas nos montantes da PEOP .....	120
Tabela 4.11 – Solicitações extremas nas vigas perpendiculares ao eixo longitudinal da PEOP.....	121
Tabela 4.12 – Solicitações extremas nas vigas paralelas ao eixo longitudinal da PEOP.....	121

# Lista de Abreviações e Símbolos

A: Área da seção transversal

$A_0$ : Área da seção transversal inicial

ASTM: American Society for Testing and Materials

CAD: Computer aided design (Desenho assistido por computador)

C: Carbono

CBCA: Centro Brasileiro de Construção em Aço

$CO_2$ : Dióxido de Carbono

COMB 1: Combinação de carregamento 1

COMB 2: Combinação de carregamento 2

COMB 3: Combinação de carregamento 3

COMB 4: Combinação de carregamento 4

CONFEA: Conselho Federal de Engenharia e Agronomia

CPs: Corpos-de-prova

CREA: Conselho Regional de Engenharia e Agronomia

Cu: Cobre

DEMET: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

E: Módulo de elasticidade

EFCB: Estrada de Ferro Central do Brasil

EFDPII: Estrada de Ferro D. Pedro II

EUA: Estados Unidos da América

F: Carga uniaxial

$F_c$ : Força centrífuga

Fe: Ferro

$Fe_3O_4$ : Magnetita

$Fe(OH)_2$ : Goetita

Fh: Impacto lateral

Fl: Força longitudinal

G: Grafita

$H_2S$ : Gás sulfídrico

HB: Dureza Brinell

$I_x, I_y$ : Momento de inércia em relação aos eixos principais de inércia “x” e “y”, respectivamente

L: Comprimento

$L_0$ : Comprimento inicial

$L_f$ : Comprimento final

$l$ : Vão da ponte

M: Momento fletor

$M_nS$ : Sulfeto de Manganês

$M_y$ : Momento fletor em torno do eixo y

$M_z$ : Momento fletor em torno do eixo z

N: Força Normal

$N_2O_3$ : Óxido nítrico

$NH_3$ : Amônia

Ni: Níquel

PBOP: Ponte da Barra, Ouro Preto/MG

PEOP: Ponte da Estação ferroviária de Ouro Preto/MG

pH: Potencial de hidrogênio

PP: Peso próprio

Q: Carga concentrada por eixo;

q: Carga distribuída linearmente na via férrea;

q': Carga distribuída linearmente no passeio.

O.A.E: Obras de arte especiais (pontes, viadutos, túneis, etc.)

R: razão entre cargas

r: raio da curva da ponte (em metros)

$r_x, r_y$ : raio de giração em relação aos eixos

RFFSA: Rede Ferroviária Federal S.A.

Si: Silício

$SO_2$ : anidrido sulfuroso

$SO_3$ : Anidrido sulfúrico

TB / TT: Trem-tipo

ST-3: Limpeza mecânica (padrão da Norma Sueca SIS 05 59 00)

VLi: Valor Logística Integrada

$V_y$  = Força Cortante na direção y;

$V_z$  = Força Cortante na direção z;

$W$ : Módulo de resistência elástico

$\alpha$ : Coeficiente de dilatação térmica

$\phi$ : Diâmetro

$\phi_0$ : Diâmetro inicial

$\varphi$ : Impacto lateral

$\gamma$ : Peso específico

$\sigma_y$ : Tensão limite de escoamento

$\sigma_u$ : Tensão limite de resistência à tração

$\Delta L$ : Variação de Comprimento

$\varepsilon$ : Deformação específica

$\nu$ : Coeficiente de Poisson

# 1 INTRODUÇÃO

Chama-se "ponte" a uma obra destinada a manter a continuidade de uma via de comunicação qualquer através de um obstáculo natural ou artificial com a característica de não interromper totalmente tal obstáculo. A via de comunicação pode ser uma rodovia, uma ferrovia ou uma via de pedestre, por exemplo. Já o obstáculo natural é, geralmente representado por um rio, um lago, um trecho de mar ou por uma depressão do terreno como um vale ou uma erosão profunda e extensa (“*canyon*”); o obstáculo artificial é representado por outra via de comunicação (cruzamento de uma rodovia ou ferrovia, por exemplo) ou um canal ou lago, construídos com uma determinada finalidade. Quando o obstáculo a ser vencido não é constituído por água, esta obra é normalmente classificada como viaduto. Tecnicamente, as pontes e os viadutos são classificados como Obras de Arte Especiais - OAE (MATTOS, 2001).

As soluções estruturais das pontes metálicas são bastante distintas entre si. Numa rápida observação, percebe-se no mundo diversas configurações para o mesmo objetivo que é permitir o tráfego de pessoas e massas, transpondo obstáculos existentes. Elas podem ser do tipo pênsil, atirantadas ou construídas por um sistema reticulado de barras simples ou compostas com ligações soldadas, aparafusadas ou rebitadas.

Toda ponte está sujeita a patologias pois as mesmas estão susceptíveis a danos por acidentes com veículos que se chocam com elementos da estrutura, ou provocados por catástrofes naturais, como terremotos, tempestades, fogo e o trincamento do próprio material, devido à existência de ciclos de carga e descarga durante longos períodos, assim como as variações de temperatura que podem provocar oscilações de algumas dezenas de graus.

Percebe-se a importância da manutenção dessas estruturas e as decisões de intervenção passam necessariamente pela ponderação entre fatores econômicos e de segurança, entre outros. Após estudos pode-se optar pelo abandono e a construção de uma nova, ou pela recuperação da mesma. Para chegar a uma conclusão é necessária uma correta avaliação do estado da estrutura. No caso de se optar por uma recuperação as soluções de reabilitação adotadas devem admitir cenários futuros de utilização da ponte e não se limitar unicamente a resolver o problema para a situação presente.

Sabendo que a ciência evolui constantemente com os erros e acertos de casos estudados, essa dissertação visa contribuir de forma positiva para o desenvolvimento do

segmento de “Patologia das Estruturas” com ênfase singular nas estruturas metálicas de pontes. Este segmento, para o caso específico do concreto armado, já é bem difundido, porém um pouco menos estudado no caso das estruturas metálicas, em comparação. As metodologias que são utilizadas para inspeção, avaliação e restauração nas pontes estudadas, contribuem para o desenvolvimento de novas estratégias a serem utilizadas em outras do mesmo gênero.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo principal reavaliar a integridade estrutural das pontes ferroviárias compreendidas no trecho entre as cidades históricas de Ouro Preto e Mariana/MG com visão dos problemas patológicos além de fazer um estudo de caso da ponte situada no quilômetro 0,0 (ou marco inicial do trecho), denominada Ponte da Estação de Ouro Preto.

Detalhando o objetivo principal pode-se elencar os seguintes objetivos específicos:

- Compreender o sistema construtivo das pontes do trecho delimitado para estudo, fazendo toda uma coleta de dados e caracterizando o trecho de forma ordenada e objetiva para o trabalho;
- Identificar e estudar as principais patologias apresentadas nas pontes da linha ferroviária entre Ouro Preto e Mariana/MG;
- Realizar um estudo comparativo da realidade atual com a situação descrita nos últimos registros acadêmicos estudados;
- Fazer uma análise numérica com o intuito de avaliar a integridade estrutural da Ponte da Estação de Ouro Preto, foco do estudo de caso deste trabalho;
- Propor intervenções nas estruturas estudadas diante da realidade encontrada e dos estudos desenvolvidos acerca das mesmas.

Em resumo, o trabalho está dividido em duas vertentes sendo que a primeira consiste no levantamento das estruturas do trecho ferroviário atentando para uma caracterização e identificação de patologias e a segunda que consiste em discutir os resultados encontrados para o estudo de caso citado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, com o objetivo de proporcionar um melhor entendimento dos temas envolvidos neste trabalho e fazer um contexto atualizado do assunto.

### 2.1 Aspectos Históricos e Culturais

Aborda-se adiante uma rápida cronologia evidenciando a importância histórica e cultural advinda ao longo dos tempos sobre o tema estudado. Com esse contexto se dá início ao entendimento dos conteúdos posteriores.

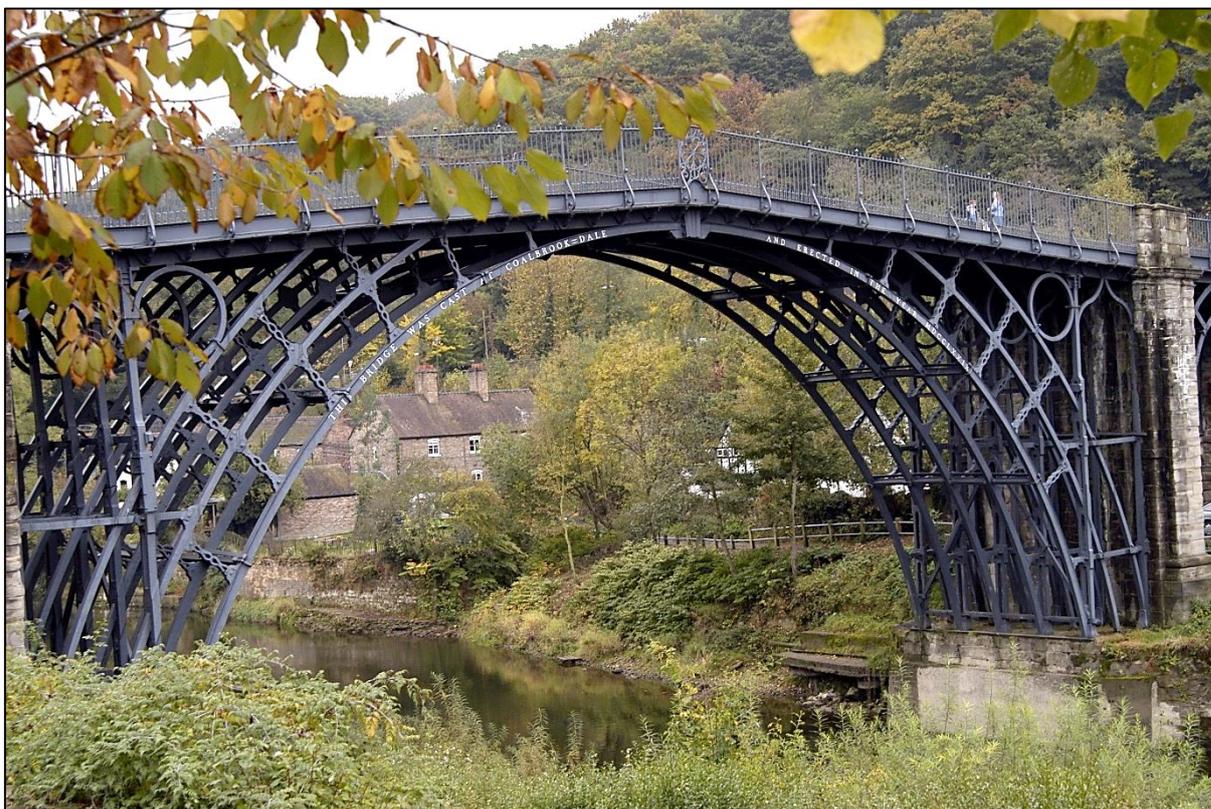
#### 2.1.1 Breve histórico das pontes

O simples fato de observar a natureza desperta no ser humano ideias e soluções para problemáticas outrora desafiadoras. Quando pedras ou árvores se depositavam sobre o leito dos rios, permitindo o seu atravessamento, percebeu-se uma forma de transpor esses obstáculos. Assim, educado pela natureza e orientado pelas suas necessidades, o homem começa a modelar estas ações do acaso e inicia-se a construção de singelos atravessamentos, derrubando árvores e movimentando pedras. Surgiam assim as primeiras pontes (SANTOS, 1998).

"Normalmente, uma história de pontes começa com um registro através de um pequeno riacho ou vinhas suspensas acima de um abismo profundo [...] seguido pelo desenvolvimento do arco de pedra pelos engenheiros romanos do segundo e primeiro séculos antes de Cristo e da construção de belas pontes em toda a Europa durante o Renascimento" (BARKER, 2013).

A Revolução Industrial dos séculos XVIII e XIX marcou a aplicação do ferro fundido com a construção de pontes. A "*Ironbridge*" (literalmente a ponte de ferro), construída por Abraham Darby III em 1779, foi a primeira ponte de todos os tempos construída toda em ferro fundido, conforme vista na Figura 2.1. Na sua ficha técnica consta como principais características o fato de ter um comprimento total de 60m, vão central de 30,5m, ter gasto 378,5t de ferro fundido e estar sobre o rio Severn, próximo a Coalbrookdale na Inglaterra. Ao ferro fundido sucedeu o emprego do aço forjado e posteriormente o aço laminado na

construção de pontes, tendo a primeira sido construída em 1863 em Maastricht, na Holanda (SANTOS, 1998).



**Figura 2.1** – Primeira ponte totalmente em ferro fundido – “Ironbridge”, Inglaterra.

Por sua vez, no Brasil, em 1857 foi construída, o que acredita ser a primeira ponte de ferro fundido que é a ponte de Paraíba do Sul com 5 tramos de 30m em treliça arqueada, com largura de 15m. Esta obra de arte especial (O.A.E.) foi construída pelo Barão de Mauá, sendo fundida em estaleiro na Ponta de Areia, em Niterói, sob a supervisão do engenheiro inglês Dadgson. Foi a primeira ponte no Brasil a se cobrar pedágio: 100 réis por cavaleiro e 60 réis por cabeça de gado. Passou por uma reforma em 1981 e constitui um excelente exemplo de durabilidade de pontes metálicas (GONÇALVES, 1992).

### 2.1.2 Breve histórico das ferrovias

A história da ferrovia começa, assim como que por acaso, por volta de 1550, nas minas da Alsácia (Bélgica), onde já havia vagão de minério, com rodas flangeadas, de madeira, correndo sobre trilhos também de madeira MRS (2012 *apud* NUNES, 2012, p.15)

Segundo Durval e Magalhaes (2006 *apud* MACÊDO, 2009, p.4), no início do séc. XIX, o inventor inglês Richard Trevithick construiu a primeira máquina capaz de aproveitar a alta pressão do vapor. Montou-a sobre uma subestrutura de quatro rodas planejada para se deslocar sobre trilhos. Em 1804, Trevithick fez uma experiência com este veículo, puxando um vagão carregado com 9 toneladas de carvão por uma extensão de 15km de trilhos. Era a primeira locomotiva bem-sucedida do mundo.

Segundo Brina (1979), a ferrovia brasileira teve sua primeira tentativa de implantação em 1835, quando o regente Diogo Antônio Feijó sancionou o Decreto 100, autorizando o governo a conceder carta de privilégios para quem fizesse uma estrada de ferro do Rio de Janeiro (então capital) para as províncias de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia.

A construção da estrada de ferro se fazia necessária, pois o país necessitava dar escoamento à produção dos produtos agrícolas destinados à exportação e ao abastecimento interno.

Em 1840, o médico inglês Tomaz Cockrane, obteve concessão para fazer a ligação ferroviária Rio de Janeiro – São Paulo com diversos privilégios. Entretanto, teve seu contrato rescindido mais tarde, pois não conseguiu dar início a obra, após sucessivos pedidos de adiamento (MACÊDO, 2009).

Em 1852, a figura corajosa do Barão de Mauá construiu a ligação entre o Porto de Mauá (no interior da Bahia de Guanabara) e a Raiz da Serra (Petrópolis). Somente em 30 de abril de 1854 foi inaugurada a Companhia Estrada de Ferro D. Pedro II (EFDPII), com 14,5 km de extensão percorridos com velocidade média de 38 Km/h, tinha raio mínimo de 290m, rampa máxima de 1,8% e bitola (distância entre os trilhos) de 1,676m. Em 15 de novembro de 1889 é proclamada a República e por aviso do Governo Provisório, a partir de 22 de novembro a Estrada de Ferro D. Pedro II passa a denominar-se Estrada de Ferro Central do Brasil (EFCB), onde se localiza o trecho entre Ouro Preto e Mariana. (BRINA, 1979)

Até o final do império, foram construídos cerca de 11.000km de linhas férreas. Já nos primeiros anos da república, a rede ferroviária brasileira cresceu para 15.000km e, na metade do século XX, evoluiu para pouco mais de 36.000km de linhas (CARDOSO, 2007).

Na Tabela 2.1 apresenta-se o cronograma de construção das principais ferrovias no período imperial.

**Tabela 2.1** - Cronograma de implantação das principais ferrovias brasileiras

<b>Ferrovia</b>	<b>Data de Inauguração</b>
Recife ao São Francisco	08/02/1858
D. Pedro II	29/03/1858
Bahia ao São Francisco	28/06/1860
Santos a Jundiá	16/02/1867
Companhia Paulista	11/08/1872
Companhia Mogiana	03/05/1875
Companhia Sorocabana	10/07/1875
Central da Bahia	02/02/1876
Santo Amaro	02/12/1880
Paranaguá a Curitiba	19/12/1883
Porto Alegre a Novo Hamburgo	14/04/1884
Dona Tereza Cristina	04/09/1884
Corcovado	09/10/1884

O Brasil possui aproximadamente trinta mil km de estradas de ferro. Para efeito comparativo, entre países do mesmo porte territorial do Brasil, os EUA possuem 162 mil km de linhas férreas e o Canadá, 73 mil km; já a Argentina, três vezes menor que o Brasil, tem 40 mil km de ferrovias (QUINTELLA, 2004).

### 2.1.3 Histórico do trecho ferroviário – Ouro Preto / Mariana

Partindo do ponto onde se inicia a história da ferrovia em Minas Gerais chega-se à 1869 que foi o ano que a então EFDPII chegou à província. A Linha do Centro da EFDPII, vencendo a Serra da Mantiqueira, se prolongou pelo território mineiro, passando por Juiz de Fora (1875), Santos Dumont (1877), Barbacena (1880) e, até alcançar Conselheiro Lafaiete (1883), foi construída em bitola de 1,60m. A partir de Conselheiro Lafaiete, a EFDPII seguiu o Vale do Rio das Velhas, em direção ao Rio São Francisco, em bitola de 1,00m.

A EFDPII lançou um ramal para atender a capital da província mineira, Ouro Preto (1888). Estendidos esses trilhos, em 1926, eles alcançariam Ponte Nova. Margeando o Rio das Velhas, a Linha do Centro atingiu Itabirito (1887) e, quando as obras se estendiam dessa cidade até Sabará, veio a República. Como a principal ferrovia do país não podia homenagear o titular do império que naufragava, a ferrovia teve seu nome alterado para Estrada de Ferro

Central do Brasil. Como EFEB, seguiram novas inaugurações: Rio Acima (1890), Raposos (1891), Sabará (1891), Santa Luzia (1893), Vespasiano (1894) e Pedro Leopoldo (1895) (BENÉVOLO, 1953).

A ferrovia entre Ouro Preto e Mariana nada mais é que um prolongamento do ramal da cidade de Ponte Nova/MG que integra a então EFEB. Detalhando o trecho específico, a cronologia das inaugurações das estações que atualmente compõem o trajeto turístico entre as cidades mostra que primeiro se inaugurou a estação de Ouro Preto (1888) e depois as estações de Vitorino Dias, Passagem de Mariana e Mariana (1914) (CARDOSO, 2007).

## **2.2 Sistemas estruturais para pontes**

Ao se analisar o desenvolvimento histórico de pontes percebe-se o progresso da engenharia estrutural desde tempos antigos até o século presente. Em particular, o desenvolvimento de pontes metálicas, está associado ao progresso em análise estrutural, ao desempenho de materiais mais resistentes e à metodologia de ensaios que permitam determinar, com maior segurança, as propriedades mecânicas dos materiais. Essa ideia do avanço tecnológico é reforçada por Gonçalves (1992), segundo ele, devido à importância e grandeza das pontes, esta obra de arte constitui marco não só por caracterizar o desenvolvimento tecnológico de uma época, como também marco arquitetônico capaz de identificar as cidades ou países onde foram construídas.

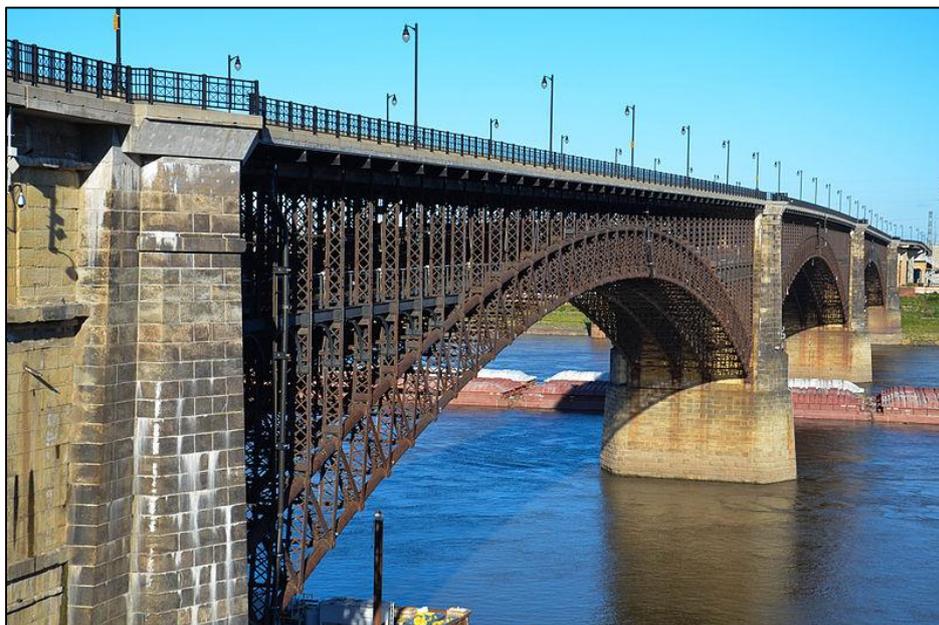
Apesar do grande avanço observado após 1779, com a introdução do ferro na construção de pontes, durante muito tempo o sistema estrutural de pontes metálicas teve ainda como base os princípios dos métodos de construção empregados nos materiais primitivos. Das pontes de pedra proveram os pórticos em arco, enquanto que as pontes de madeira evidenciaram a base para as vigas estruturadas em treliça.

Segundo Gonçalves (1992), à medida que se desenvolveu as técnicas construtivas e o conhecimento sobre os materiais, aumentou a utilização das pontes como recurso para a diminuição das distâncias e melhoria dos transportes. O uso deste recurso traz consigo a necessidade de regulamentação. Em 1830, as locomotivas a vapor tinham aproximadamente 50kN por eixo, já no final do século, tinham próximo de 270kN. Para regulamentar este amplo gradiente de sobrecarga, foi inventado o conceito de trem tipo, onde o carregamento era associado a um determinado padrão que definia a capacidade da via. O trem tipo foi utilizado no mundo inteiro, inclusive no Brasil, através das prescrições previstas em normas específicas.

Ao analisar as tipologias construtivas das pontes pode-se verificar características peculiares importantes de serem mencionadas nessa revisão.

### 2.2.1 Pontes em arco

A ponte em arco é a forma mais apropriada para estruturas de pontes de pedra, devido as propriedades específicas deste material. Tais estruturas não ultrapassavam vão maiores que 40m. A referida ponte “*Ironbridge*” também foi construída com essa tipologia. Após o progresso com o ferro fundido, a metodologia de construção foi aprimorada e vãos maiores foram construídos em arco. O próximo passo na construção de pontes metálicas foi o aprimoramento das técnicas de fabricação do aço, reduzindo os custos de fabricação e popularizando-o no ramo da construção civil em geral, incluindo aí, a construção de pontes. A “Ponte Mississippi, em St. Louis, EUA, foi construída em 1874 e já apresenta arcos em elementos tubulares fabricados em aço, vencendo três vãos consecutivos de 159m de extensão cada. A estrutura totaliza 1964m de comprimento e contava ainda com viadutos de acesso em arcos de alvenaria de pedra conforme mostra a Figura 2.2 (CARDOSO, 2007).



**Figura 2.2** – Ponte Mississippi, St. Louis, EUA.

Percebe-se um grande avanço na construção de pontes em arco quando começou a se fazer uso de arcos com esteios, segurando o tabuleiro da ponte. Este novo sistema estrutural permitiu transpor vãos acima de 500m, porém só foi viável com a utilização de aços mais resistentes. A ponte “*Sydney Harbour Bridge*” (Figura 2.3), projetada por R. Freeman, em 1932, com vão de 503m, é um exemplo desse tipo de estrutura.



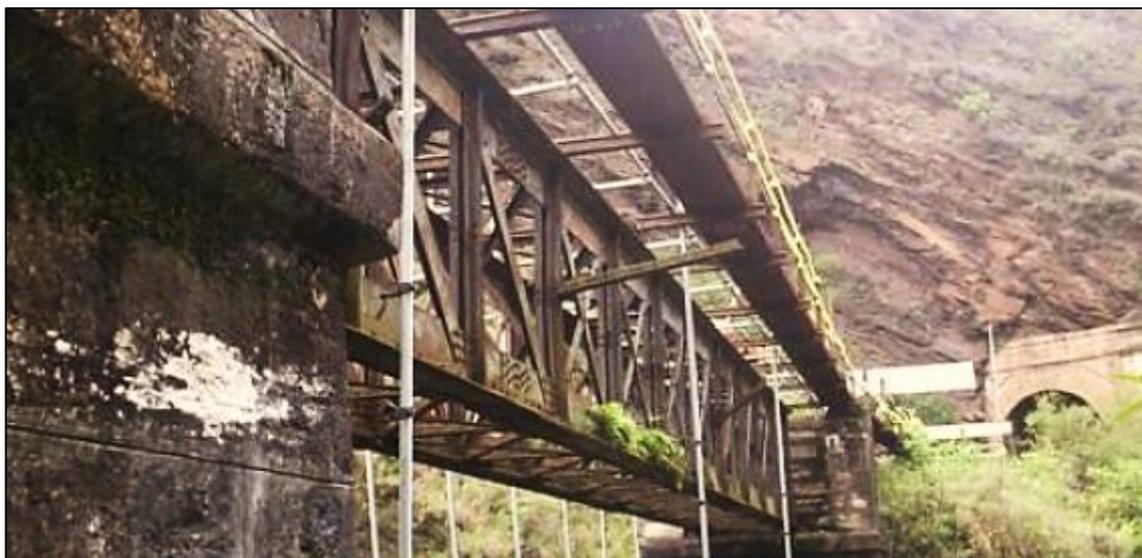
**Figura 2.3** – Ponte “*Sydney Harbour Bridge*”, Sydney, Austrália.

Somente em 2002 o Brasil teve, então, uma representante de expressão no segmento das pontes metálicas em arco com a inauguração da Ponte Juscelino Kubitschek – JK construída sobre o lago norte da cidade de Brasília – DF. A obra Projetada pelo arquiteto Alexandre Chan, e executada pelos engenheiros Mário Vila Verde e Filemon Botto de Barros, ostenta três arcos centrais com vãos de 240m de extensão cada e um comprimento total de 1.200m que se integra adequadamente a arquitetura moderna da cidade.

### 2.2.2 Pontes em vigas

A ponte estruturada em vigas só foi possível mais de cinquenta anos depois da utilização do ferro fundido em elementos estruturais. Isso porque o ferro fundido empregado naquele contexto histórico somente podia ser usado para resistir a esforços de compressão. Com o advento do aço em elementos estruturais e suas capacidades de resistir também às tensões de tração na flexão ficou viável a concepção de pontes estruturadas em vigas.

As pontes metálicas em vigas treliçadas foram frequentemente projetadas, particularmente nos EUA, onde transferiu-se os conhecimentos até então aplicados nas estruturas de madeira para as pontes de aço, durante a primeira metade do século XIX. A escolha desse sistema estrutural se deu justamente pelo fato das barras estarem sujeitas à esforços de compressão ou tração. No Brasil tem-se como exemplo, a “Ponte do funil”, na cidade de Ouro Preto-MG, projetada por Caetano Lopes Jr. Em 1914. Tal ponte possui 21m de extensão e pode ser vista na Figura 2.4. Na Europa, os exemplos clássicos são as pontes especialmente projetadas por Gustave Eiffel, na França e em Portugal.



**Figura 2.4** – “Ponte do Funil” Ouro Preto-MG, durante recuperação em 2005.

Além das vigas metálicas treliçadas tem-se o conceito de viga caixão desenvolvido em 1844 por Robert Stephenson e aplicado na construção de uma ponte sobre o “*Strait de Menai*”. Stephenson decidiu construir uma ponte com dois tubos retangulares, com 4.4m de largura e 9.0m de altura cada. No Brasil, um exemplo clássico com essa configuração estrutural, é a Ponte Rio Niterói em seus vãos centrais (Figura 2.5), sendo esses com 848m construídos com duas vigas caixão em aço de 6,86m de largura e 7,42m de altura cada e vão central de 300m. Tal ponte, inaugurada em 1974 possui o maior vão em viga contínua do mundo, dados de 2007.



**Figura 2.5** – Vão central da Ponte Rio-Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

Por fim, e ainda abordado o conceito de pontes estruturadas em vigas, merece destaque também as vigas parabólicas. Apresenta-se com o banzo superior convexo como também a viga com formatos semelhantes à barriga de peixe, com os dois banzos curvos, porém em sentidos opostos. Elas têm o objetivo de distribuir melhor os esforços na viga treliçada. O último sistema estrutural apresentado, também chamado de “Viga de Pauli”, distribui de forma uniforme as tensões nos banzos, sendo praticamente uniforme ao longo do vão. Como exemplo, apresenta-se a Ponte de Portimão, também conhecida como Ponte do Arade, localizada no distrito de Faro em Portugal (Figura 2.6).



**Figura 2.6** – Ponte ferroviária de Portimão - Portugal.

### 2.2.3 Pontes suspensas

Após a explanação sobre as pontes em arco e em vigas vale salientar as pontes suspensas, existindo aí a ponte pênsil e a estaiada. As pontes metálicas suspensas da forma como é conhecida é uma evolução das pontes de corda e madeira desenvolvida pelos povos antigos e ainda hoje muito utilizadas na China, Índia e América do Sul. Suspensa sobre dois extremos elevados sobre um rio ou um vale, as pontes simples de corda e madeira, seguem um arco descendente raso, onde os esforços na corda são apenas de tração, permitindo que o material seja aproveitado ao máximo e assim permitir a transposição de grandes vãos. O arco utilizado na ponte suspensa em curva catenária é o caso oposto ao empregado nas pontes de pedra, onde os esforços são todos de compressão. A Ponte 25 de Abril (anteriormente conhecida como Ponte Salazar – Figura 2.7) é uma ponte suspensa rodoferroviária que liga a cidade de Lisboa à cidade de Almada, em Portugal e exemplifica uma ponte pênsil.



**Figura 2.7** – Ponte 25 de Abril, Lisboa, Portugal.

No Brasil, o primeiro exemplar de ponte estaiada começou a ser construído no ano 2000, em São Paulo sob a responsabilidade do Eng. Catão Francisco Ribeiro e executada pela construtora OAS Ltda. Chamada Ponte Estação Santo Amaro, faz parte do empreendimento de ligação metroviária Capão Redondo – Largo Treze, da linha 5 do Metrô de São Paulo. A referida ponte, que tem 230,75m de extensão total, pode ser vista na Figura 2.8.



**Figura 2.8** – Ponte Estação Santo Amaro, São Paulo, Brasil.

## 2.3 Materiais Utilizados em Pontes

Tecnicamente, a maior parte dos metais e ligas encontradas comercialmente, tais como aço, ferro fundido, latão, bronze, ligas de alumínio, etc., poderia ser empregada na construção de pontes, no entanto quando é ressaltada a viabilidade do empreendimento este número fica bastante reduzido.

O primeiro uso de material metálico na construção de pontes em larga escala veio com o ferro fundido. Pela baixa resistência mecânica e fragilidade, seu uso tornou-se impróprio. O

ferro pudlado substituiu-o nas construções após 1850. Com a construção de muitas pontes ferroviárias usando ferro fundido e forjado, surgiu a necessidade de um melhor material de construção (PINHO, 1998). O desenvolvimento do aço Bessemer, por volta de 1856, e a fabricação em escala, permitiram a utilização do aço na construção de pontes a um custo razoável.

Segundo o CBCA os aços carbono ou baixa liga são essencialmente compostos de ferro e uma pequena quantidade de carbono. Adicionam-se ainda outros elementos em pequenas quantidades para produzir a liga apropriada. Na atualidade as pontes metálicas são construídas quase que na totalidade em aço de média e/ou alta resistência mecânica.

Logo, neste item são abordados os dois materiais mais relevantes na evolução da construção de pontes metálicas. Primeiramente se aborda os fundamentos acerca do ferro fundido e depois chega-se aos aços de uso constante e foco deste trabalho. Não será abordado, embora, muitas vezes presente, o concreto armado ou outros materiais que podem servir para a construção de pontes.

### 2.3.1 Fundamentos de ferros fundidos

Segundo Chiaverini, (2005) os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, não só devido às características inerentes ao próprio material, como também pelo fato de, mediante introdução de elementos liga, aplicação de tratamentos térmicos adequados e pelo desenvolvimento do ferro fundido nodular, ter sido viável ao seu emprego em aplicações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços.

Costuma-se definir ferro fundido como “as ligas Fe-C cujo teor de carbono se situa acima de 2,0% aproximadamente”. Face à influência do silício nessa liga, sobretudo sob o ponto de vista de sua constituição estrutural, o ferro fundido é normalmente considerado uma “liga ternária Fe-C-Si”, pois o silício está frequentemente presente na composição (CHIAVERINI, 2005).

Um dos aspectos mais relevantes dos ferros fundidos é que o carbono pode estar presente de maneiras distintas: dissolvido, ou seja, em solução sólida nas fases diversas; combinado ao ferro, na forma de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ); e isolado, como grafita (G), com estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). A ocorrência de cada uma das formas mencionadas leva a propriedades específicas e se dá essencialmente devido a dois fatores: a composição química e a velocidade de resfriamento do material (COLPAERT, 2008; CHIAVERINI, 2005).

Além dos elementos químicos citados acima, encontra-se presente na composição do ferro fundido, em menor quantidade, o manganês, fósforo e enxofre. Atualmente, a classificação dos ferros fundidos em diferentes grupos é conduzida, em geral, de acordo com a forma da grafita, com o aspecto de sua fratura ou com alguma propriedade mecânica (GUESSER, 2009). Dentro desse contexto, as principais famílias de ferro fundido são destacadas abaixo.

### 2.3.1.1 *Ferro Fundido Branco*

Os ferros fundidos brancos exibem, de maneira geral, teores de silício inferiores a 1% e taxas de resfriamento relativamente altas (CALLISTER, 2008), podendo apresentar ainda o cromo como elemento de liga (DE PARIS, 2003 *apud* ALMEIDA, 2014, p.25). Para sua produção industrial, em geral, emprega-se o chamado sistema de coquilhamento, consistindo em verter a liga em moldes metálicos fazendo com que a mesma se resfrie em condições tais que praticamente todo o processo de grafitação é eliminado (CHIAVERINI, 2005). Portanto, essas ligas não apresentam o carbono livre na forma de grafita, mas sim na sua forma combinada, como cementita.

As características principais dos ferros fundidos brancos, devido à alta quantidade de cementita, são: elevada dureza e resistência ao desgaste e baixas tenacidade e usinabilidade. É classificado como um material de difícil soldagem, sendo ainda considerado como o primeiro produto para a fabricação dos ferros fundidos maleáveis (DE PARIS, 2003 *apud* ALMEIDA, 2014, p.27). Por fim, boas resistências à corrosão e à oxidação ainda podem ser verificadas nesses metais, mediante a adição de elementos de liga, como o silício, o níquel e o cromo (KRAUSS 1990, *apud* ALMEIDA, 2014, p.27).

### 2.3.1.2 *Ferro Fundido Cinzento*

Os ferros fundidos cinzentos, apontados como os ferros fundidos mais aplicados industrialmente, exibem teores de carbono e silício que variam entre 2,5% e 4% e 1% e 3%, respectivamente (CALLISTER, 2008). Apresentam até cerca de 0,8% de carbono na forma combinada, como cementita, e o resto como grafita (DE PARIS, 2003 *apud* ALMEIDA, 2014, p.27), constituinte que aparece em forma de veios.

O limite de resistência dos ferros fundidos cinzentos se situa numa faixa de 100MPa a 400MPa, (GUESSER,2009). A forma da grafita em veios conduz a elevados valores de condutividade térmica, o que leva esses ferros fundidos a serem largamente

empregados em componentes submetidos a elevados ciclos térmicos, tais como: cabeçote de motores de combustão interna, tambores e discos de freio entre outros. Outra propriedade importante é a capacidade de amortecimento de vibrações, sendo atrativo o seu uso em bases de máquinas. Por fim, são relacionadas a essas ligas características como boa usinabilidade, alta fluidez na temperatura de fusão, elevada resistência ao desgaste e custo relativamente baixo. Sua baixa resistência à tração é relacionada à morfologia dos veios de grafita, que agem como pequenas trincas internas, tornando o material frágil (DE PARIS, 2003).

### 2.3.1.3 *Ferro Fundido Maleável*

A primeira tentativa de se produzir ferros fundidos mais tenaz data do princípio do século XVIII, período no qual teria sido desenvolvido o chamado ferro fundido maleável branco, seguido, no início do século XIX, do desenvolvimento do ferro fundido maleável preto ou de núcleo preto (COLPAERT, 2009).

Os ferros fundidos maleáveis são aqueles obtidos a partir da realização de tratamentos térmicos de maleabilização nos ferros fundidos brancos, apresentando em sua microestrutura final grafita com contornos rendilhados ou em agregados (CHIAVERINI, 1987 *apud* ALMEIDA, 2014, p.30).

Na produção do ferro fundido maleável de núcleo branco, o ferro é fundido como um componente de ferro fundido branco. Em seguida, o material é descarbonetado, durante um tratamento térmico. Na fabricação de componentes de ferro fundido maleável de núcleo preto, um tratamento térmico inicial para a ocorrência de grafitização é conduzido, realizado a temperaturas entre 900°C a 970°C. Em geral, esses materiais exibem como características principais resistência mecânica à tração similar àquela observada nos aços e boa ductilidade (ALMEIDA, 2014).

### 2.3.1.4 *Ferro Fundido Nodular*

Os ferros fundidos nodulares foram desenvolvidos no intuito de combinar propriedades consideradas interessantes dos ferros fundidos e dos aços (COLPAERT, 2008), como a capacidade de fundição dos primeiros e a tenacidade dos segundos. Apesar das características citadas, a princípio, serem observadas nos ferros fundidos maleáveis, o alto custo decorrente dos tratamentos térmicos requeridos e a dificuldade de fundir componentes de ferro fundido branco sem defeitos limitaram sua utilização, levando, desta forma, à

necessidade de elaboração de outra alternativa. Dentro deste contexto, na metade do século XX (em 1948) foi apresentado o ferro fundido nodular, com obtenção deste ano seguinte (LABRECQUE, CAGNE, 1998 *apud* ALMEIDA, 2014, p.33).

Ainda segundo Labrecque & Cagne, (1998 *apud* ALMEIDA, 2014, p.33) em termos de composição química, os ferros fundidos nodulares possuem geralmente teor de carbono entre 3,5% e 3,8% e teor de silício entre 1,8% e 2,8%, podendo conter ainda cobre, níquel, molibdênio e manganês.

De maneira geral, associando a microestrutura desenvolvida às propriedades do ferro fundido nodular, a liga exibindo nódulos de grafita em uma matriz ferrítica apresenta boa ductilidade e tenacidade, com também relativamente bons limites de escoamento e resistência, compatíveis com um aço de teor de carbono reduzido (GONZAGA, 2013). Por outro lado, a presença dos nódulos de grafita em uma matriz perlítica implica em alta resistência mecânica, boa resistência ao desgaste e moderadas ductilidade e tenacidade. Em um ferro fundido nodular exibindo matriz ferrítica e perlítica as propriedades são consideradas intermediárias (ALMEIDA, 2014).

### 2.3.2 Fundamentos de aços

O aço é uma liga metálica de ferro e carbono, podendo conter ou não elementos de liga e com porcentagens de carbono que variam entre 0,008 e 2,11% (massa), além de certos elementos residuais, originários dos processos de fabricação. O limite inferior a 0,008% corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro  $\alpha$  (estrutura cristalina cúbica de corpo centrado) à temperatura ambiente e o limite superior 2,11% correspondente à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro  $\gamma$  (estrutura cristalina cúbica de face centrada) e que ocorre a 1148°C (CHIAVERINI, 2005).

A importância do aço provém de vários fatores: resistência mecânica, ductilidade, relativa homogeneidade, possibilidade de ser forjado, laminado, estampado, trefilado, extrudado, fundido, caldeado, soldado, usinado, modificado em suas propriedades por meio de tratamentos mecânicos, térmicos e químicos (BRINCK, 2004).

De acordo com o CBCA (Centro Brasileiro de Construção em Aço) existe uma grande variedade deste produto, com mais de 3500 tipos diferentes de aços, dos quais cerca de 75% foram desenvolvidos nos últimos vinte anos. Isso mostra a grande evolução que o setor tem experimentado.

Para utilização na construção civil, o interesse maior recai sobre os chamados aços estruturais, termo designativo de todos os aços que, devido à sua resistência mecânica, ductilidade e outras propriedades são adequados para utilização em elementos que suportam cargas. Estes aços podem possuir em sua composição elementos de ligas tais como Cu, Ni, além de outros (CÂNDIDO, 2005).

Resumidamente, Afonso (2007), destaca separadamente em três grupos, de acordo com sua tensão de escoamento,  $\sigma_y$ :

- Aço carbono de média resistência mecânica: (ordem de 250MPa);
- Aço de alta resistência mecânica e baixa liga (acima de 300MPa);
- Aços ligados tratados termicamente (acima de 700MPa).

O aumento do teor de carbono eleva a resistência mecânica do aço, porém diminui a sua ductilidade. Por isso, em estruturas usuais de aço, utilizam-se preferencialmente aços com baixo teor de carbono até moderado carbono. Desta forma não há necessidade de procedimentos com soldas (CARDOSO, 2007).

O percentual (em massa) de carbono presente em cada tipo de aço estabelece um tipo de classificação muito usual na engenharia dos materiais que consiste em dividir os aços, em faixas desse percentual. Portanto, podem ser classificados em: aço de baixo, médio ou alto carbono. Cada classificação reúne características peculiares e que proporcionam melhor conhecimento e aplicação para cada situação requerida na vida prática. Na Tabela 2.2 apresenta-se as principais características e aplicações dos aços carbono.

**Tabela 2.2** - Principais características e aplicações dos aços carbono

CLASSE	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	CARACTERÍSTICAS	PRINCIPAIS APLICAÇÕES
BAIXO CARBONO	< 440	Boa tenacidade, soldabilidade e conformabilidade	Pontes, navios, caldeiras, tubos estruturais, etc.
MÉDIO CARBONO	Entre 440 e 590	Média soldabilidade e conformabilidade	Estruturas parafusadas de navios e vagões, tubos, estruturas mecânicas, etc.
ALTO CARBONO	Entre 590 e 780	Má soldabilidade e conformabilidade, alta resistência ao desgaste	Peças mecânicas, implementos agrícolas, trilhos e rodas ferroviárias

## 2.4 Patologias em Pontes

O termo patologia é amplamente conhecido da medicina e áreas da saúde. Estado patológico, na medicina, significa estado doentio, de anormalidade, de falta de saúde. Na engenharia o sentido é o mesmo. Na prática, a patologia das construções é o estudo de situações de ocorrências de problemas, de falhas ou de defeitos que comprometem uma ou mais das funções da estrutura, ou ainda todo seu conjunto, como se estivesse mesmo doente e sua doença precisasse ser diagnosticada e tratada. O reparo da patologia, assim como o tratamento na medicina, visa recuperar as funções (ou a saúde) da construção.

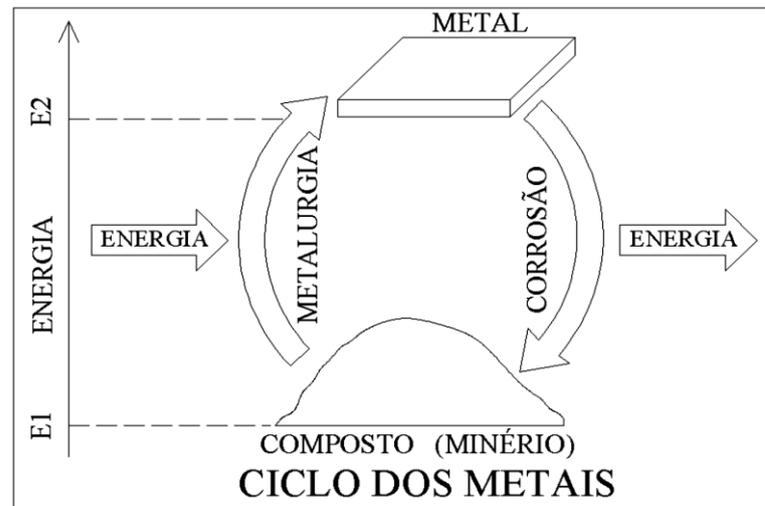
Na esfera da construção civil, os problemas patológicos podem ser ocasionados na concepção do projeto, na execução do mesmo ou, ainda, obtidos após a construção. Grande parte das patologias apresentadas poderia ser evitada na fase de projeto com a correta seleção dos materiais empregados, dos métodos construtivos e dos sistemas estruturais que estão de acordo com as normas técnicas vigentes. Pelo do aprimoramento das técnicas construtivas, capacitação da mão de obra, investimento em equipamentos de montagem e industrialização da produção é possível reduzir os erros de construção, na qual se originam as patologias (CARDOSO, 2007).

Dentre os diversos fenômenos patológicos suscetíveis às estruturas metálicas, os de maior ocorrência e que causam maiores danos são os que serão abordados a seguir de forma individual para melhor compreensão de cada patologia.

### 2.4.1 O fenômeno de corrosão

A corrosão pode ser definida como sendo a deterioração de um material, por ação química e/ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2007). Ainda, segundo o mesmo autor, o conhecimento da forma e do mecanismo de corrosão auxilia bastante na identificação e na aplicação de medidas adequadas de recuperação e prevenção.

Pode-se dizer, de forma resumida, que a corrosão é o inverso da metalurgia, ou seja, é a tendência de o material retornar a sua forma primitiva, que é a mais estável, na forma de compostos. Na Figura 2.9 representa-se esquematicamente esse processo.



**Figura 2.9** – Ciclo energético dos metais,  $E_2 > E_1$

No estudo da corrosão pode-se classificá-la em dois grandes grupos, sendo a corrosão química (ou seca) e a corrosão eletroquímica (ou úmida) ambas detalhadas a seguir:

- Corrosão química: É um processo que se realiza na ausência da água, em geral em temperaturas elevadas (oxidação em alta temperatura). Ocorre quando uma superfície metálica é colocada na presença de um gás ou um líquido anidro (o principal agente desse tipo de corrosão é o oxigênio), havendo a reação entre os dois, com formação de um sal ou de um óxido. (CARDOSO, 2007). Esse óxido formará uma camada sobre a superfície do metal que, dependendo da natureza deste, poderá ser permeável ou impermeável à difusão do oxigênio. Na camada de óxido constituída, ocorre a difusão de íons do metal e do oxigênio, que será tanto mais lenta quanto mais espessa for a camada de óxido. Se a camada de óxido for removida por algum processo, como abrasão, por exemplo, a oxidação continuará (em um meio oxidante) e a espessura do metal diminuirá progressivamente.
- Corrosão eletroquímica: ocorre em uma superfície metálica onde existem pequenas regiões ou pontos com potenciais eletroquímicos diferentes, em virtude de pequenas alterações na composição do metal, de diferentes níveis de tensão, de variações de temperatura, de diferentes graus de aeração, ou de alterações do meio ambiente. Esses pontos constituem pequenas regiões anódicas ou catódicas na superfície do metal. Eles atuam como se fossem contatos elétricos abertos, ainda inativos, no entanto, se o metal estiver na presença de algum eletrólito haverá a dissolução de sais ou gases e os circuitos

se fecharão desencadeando o processo de corrosão. É como se a superfície metálica fosse tomada por uma grande quantidade de células de corrosão, que nada mais são do que pequenas pilhas (BRINCK, 2004).

As condições do meio em que um metal (ou estrutura de aço) se encontra determinam o tipo de tratamento que deverá ser empregado para protegê-lo dos efeitos da corrosão (DIAS, 2008). Os meios corrosivos mais comuns e suas particularidades são elencados a seguir:

- Atmosfera: a corrosividade decorre principalmente da presença de partículas de poeira, de umidade e de gases corrosivos, como o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), anidrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ), anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ) e óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}_3$ );
- Águas Naturais: são corrosivas, pois podem conter gases, sais minerais, matéria orgânica, microorganismos. A água de mar é um dos meios mais corrosivos que existem tanto em imersão quanto na atmosfera. A corrosividade do ambiente marinho é devida principalmente, à presença de cloreto de sódio, que é um sal muito ativo e de grande solubilidade em água;
- Solo: tem sua corrosividade devido à porosidade, umidade, sais minerais, acidez ou alcalinidade, bactérias, etc.;
- Produtos Químicos: a corrosão pode ser originada por vapores, respingos ou, ainda, por contato direto de ácidos, bases, sais, óxidos ou solventes orgânicos;
- Outros: águas industriais.

As condições meteorológicas, tais como temperatura, vento, umidade relativa e índice pluviométrico, desempenham um papel de grande importância nos processos de corrosão atmosférica. Para alguns parâmetros, a influência é muito bem definida, enquanto que para outros, os efeitos se contrapõem (CARDOSO, 2007). A Tabela 2.3 apresenta de forma sintética a contribuição de cada um destes fatores na corrosão atmosférica de metais.

**Tabela 2.3** - Influências dos fatores meteorológicos na corrosão atmosférica

<b>Fator meteorológico</b>	<b>Ação benéfica</b>	<b>Ação maléfica</b>
Temperatura	Evaporação da água, mantendo a superfície seca.	Aumenta a velocidade das reações eletroquímicas.
Vento	Evaporação da água, mantendo a superfície seca.	Condutores de poeira.
Umidade relativa ( >60% )	-	Forma um filme de eletrólito na superfície metálica.
Chuva	Limpa as superfícies	Acúmulo de água e aumento da umidade relativa.

**Fonte:** CÂNDIDO, 2005

Na literatura se encontram várias subdivisões para as diferentes formas de corrosão. Em sua maioria, as manifestações mais comuns e que afetam as estruturas metálicas em potencial (e que serão abordadas individualmente na sequência deste) são a corrosão uniforme, a localizada (subdivida ainda em corrosão por pites, corrosão sob tensão, intergranular e frestas) e a corrosão galvânica.

#### *2.4.1.1 Corrosão uniforme*

Ocorre quando toda a superfície metálica, exposta ao meio corrosivo, sofre de maneira uniforme o mesmo desgaste, ou seja, a perda de espessura é praticamente igual em toda a região exposta ao processo corrosivo (FÓFANO; JAMBO, 2009). É o tipo mais comum de corrosão e o menos agressivo, não tendo relação qualquer com a perfuração ou danos estruturais.

Por ser visível, é facilmente detectada e, por isso, a menos perigosa das formas de corrosão e é facilmente controlável. São exemplos de corrosão uniforme o “enferrujamento” dos aços ao carbono em contato com a atmosfera e ao ataque químico de um metal por um ácido. Alguns metais, como o alumínio, e ligas, como o aço inoxidável, são muito resistentes à corrosão uniforme, pois apresentam camada passiva em ambientes oxidantes. Tal corrosão pode ser observada na Figura 2.10 que mostra um elemento estrutural da Ponte da Estação de Ouro Preto (PEOP) afetada pela corrosão uniforme.



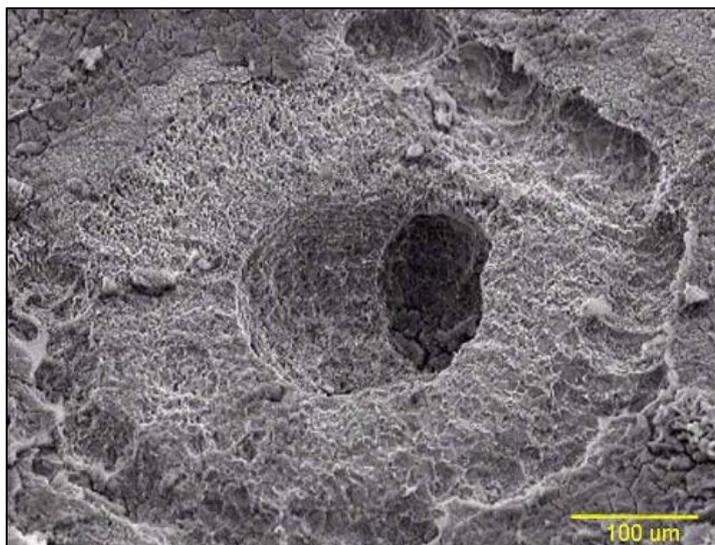
**Figura 2.10** – Corrosão uniforme na Ponte da Estação de Ouro Preto – MG.

#### 2.4.1.2 *Corrosão por pite*

Na corrosão por pite (dita também na literatura como corrosão puntiforme ou “pitting”), praticamente não há perda de massa do metal, mas de maneira não uniforme. Neste caso, a corrosão localiza-se em alguns pontos, estando os pites distribuídos ao acaso. O pite pode ter diversas formas e dimensões, mas sempre apresenta a profundidade maior do que o diâmetro. Por isso, o pite pode atravessar completamente a espessura de uma chapa metálica (DIAS, 2008).

Percebe-se que a corrosão por pites ocorre em materiais que são geralmente resistentes à corrosão uniforme. Este é o caso, por exemplo, dos aços inoxidáveis e ligas de alumínio. O pite ocorre em função da desestabilização da película passivante por agentes do meio (por exemplo, íons cloreto), propiciando a ocorrência do ataque localizado (CARDOSO, 2007). Esse tipo de corrosão é a principal responsável pela perfuração de tanques e de dutos que transportam fluidos principalmente água. Na Figura 2.11 evidencia-se a corrosão por pite observada em um microscópio eletrônico em um elemento de aço inoxidável.

A corrosão por pites é uma forma de corrosão localizada que produz cavidades na superfície. O pite é um concentrador de tensões que pode nuclear trincas por corrosão sob tensão e por fadiga. Geralmente áreas muito pequenas da superfície metálicas são atacadas enquanto o restante da superfície permanece inalterada.



**Figura 2.11** – Imagem de microscopia eletrônica de varredura de um pite em um aço inoxidável.

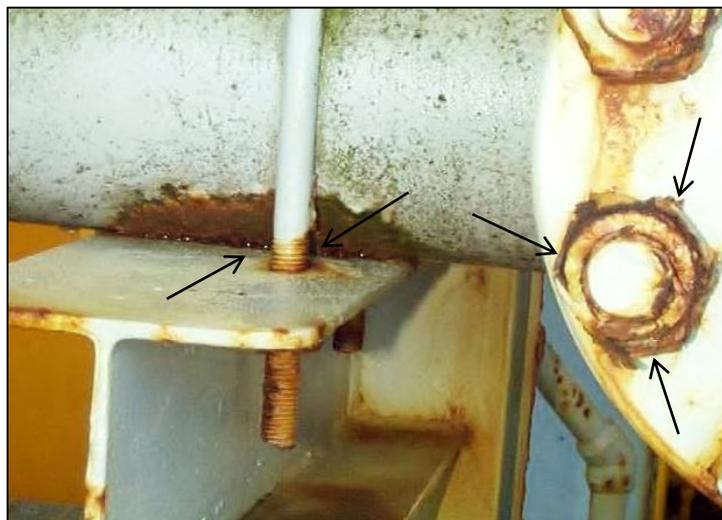
#### 2.4.1.3 *Corrosão por frestas*

O mecanismo corrosão por frestas é semelhante à corrosão por pites, onde o ataque também é localizado geralmente em pequenas áreas da superfície metálica (CARDOSO, 2007). A diferença está em que a fresta é um ambiente ocluso pré-existente, enquanto que o pite se forma sobre uma superfície livre.

Esse tipo de corrosão é prejudicial e pode ser de difícil identificação, pois age de forma concentrada em uma área relativamente pequena da estrutura, enquanto o restante da peça metálica conserva-se intacto. O ataque pode ser rápido e frequentemente tem por resultado falhas inesperadas ou prematuras. Este tipo de corrosão é frequentemente associado com pequenas quantidades de água estagnada ou eletrólito preso em furos e frestas, tendo maior ocorrência: em união de perfis dobrados, perfis compostos e ligações parafusadas e rebitadas (Cardoso, 2007).

Pode-se dizer que a corrosão em fresta possui quatro estágios bem definidos para a sua ocorrência de forma efetiva. O primeiro estágio é a desoxigenação da fresta que é lento e vai consumindo o oxigênio do meio pela reação catódica. O segundo estágio consiste no abaixamento do potencial de hidrogênio (pH) do meio. Segue o terceiro estágio que é basicamente função da natureza do metal, pois é o tempo necessário para que as etapas anteriores produzam a solução crítica que torna o filme instável e inicia a corrosão ativa dentro da fresta. Esta condição é definida como uma solução com dado pH e dada concentração de íons agressivos, para cada metal, temperatura, meio e geometria da fresta. O

último estágio é a evolução propriamente dita da corrosão na fresta. Percebe-se nitidamente, na região de contato entre a tubulação e o perfil metálico suporte da Figura 2.12, a corrosão por fresta.



**Figura 2.12** - Corrosão por fresta entre tubulação e perfil metálico suporte.

#### 2.4.1.4 Corrosão galvânica

Segundo Cardoso, (2007) a corrosão galvânica ocorre quando dois metais com potenciais eletroquímicos diferentes são colocados em contato na presença de um mesmo eletrólito. O mesmo processo pode realizar-se no caso de metais de igual potencial imersos em eletrólitos diferentes ou no caso de metais diferentes em eletrólitos diferentes. O metal com menos potencial eletroquímico (anódico) vai corroer em preferência ao metal com maior potencial (catódico) e será protegido.

Os três pré-requisitos básicos para ocorrência da corrosão galvânica são ligas metálicas com diferentes potenciais de corrosão, conectadas eletricamente e imersas pelo mesmo eletrólito. Um caso real está representado na Figura 2.13 que apresenta a corrosão galvânica entre o aço e o latão.

A partir da corrosão galvânica é possível gerar energia (por exemplo, pilhas) e proteger os metais empregando-se a proteção catódica (anodo de sacrifício em estruturas submersas).



**Figura 2.13** - Típica corrosão galvânica entre o aço e o latão, destaca-se também, a corrosão por fresta

## 2.4.2 O fenômeno da fadiga

Dá-se o nome de fadiga à forma de falha que ocorre em estruturas submetidas a tensões dinâmicas e oscilantes, tais como pontes, aeronaves e componentes de máquinas. Sob essas circunstâncias, é possível que uma falha ocorra em um nível de tensão consideravelmente menor do que o limite de resistência à tração ou o limite de escoamento para uma carga estática (CALLISTER, 2008).

Qualquer tensão que oscile no tempo pode potencialmente acarretar em uma falha por fadiga. As características destas tensões alteram substancialmente de acordo com a aplicação enfocada. De modo geral, as tensões variáveis no tempo são divididas em dois grupos: o das tensões de amplitude constante e o das tensões de amplitude variável. As tensões de amplitude constante têm, normalmente, natureza determinística e estão relacionadas com máquinas rotativas. As tensões de amplitude variável têm uma frequência de atuação variável, o que faz com que elas tenham, na maioria das vezes, uma natureza aleatória, que será mais ou menos intensa de acordo com as características da carga. As tensões associadas ao tráfego de um veículo têm amplitude e frequência variáveis, sendo de natureza aleatória (AFONSO, 2007).

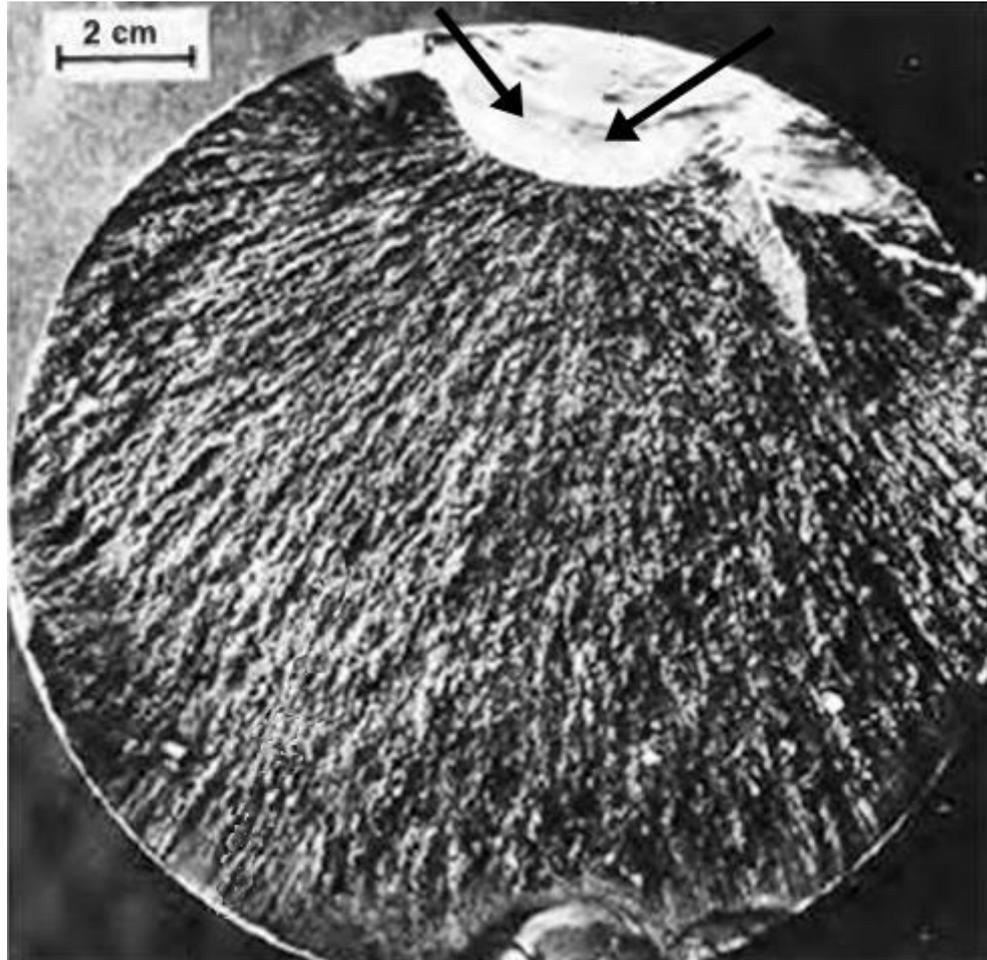
É importante explicar, segundo Norton (1998, *apud*, AFONSO, 2007, p. 9) que a fadiga também pode ser motivada por um estado de tensões constante desde que haja corrosão associada, como por exemplo em estruturas metálicas que trabalham sob o ataque de água marítima ou de outros elementos corrosivos tais como chuva-ácida.

Segundo Callister (2008), mesmo nos metais com comportamento dúctil, a falha por fadiga é de natureza frágil, existindo muito pouca, ou nenhuma, deformação plástica generalizada associada à falha. Esse processo de falha é caracterizado pelos três distintos estágios:

- Nucleação da trinca, onde uma pequena trinca se forma em algum ponto, geralmente de alta concentração de tensões;
- Propagação da trinca, durante a qual essa trinca avança incrementalmente com cada ciclo de tensões;
- Falha final, que ocorre muito rapidamente uma vez que a trinca que está avançando tenha atingido um tamanho crítico.

Em pontes metálicas, os aspectos mais vulneráveis aos efeitos da fadiga são as peças tracionadas, os furos de ligação rebitada e/ou parafusada e os cordões de solda. Em linhas gerais é importante ressaltar que existem algumas variáveis que influenciam sensivelmente no comportamento de fadiga de materiais de engenharia. Alguns desses fatores são o nível de tensão médio, questões ligadas ao projeto geométrico, tratamento de superfície, variáveis metalúrgicas além de aspectos do ambiente no qual a estrutura se encontra.

A fratura por fadiga é típica e geralmente apresenta-se fibrosa na região da propagação da trinca e cristalina na região da ruptura repentina. No caso de estruturas de pontes metálicas ferroviárias, tal comportamento é causado por carregamentos de amplitude variável oriundos, principalmente, do tráfego das composições. Neste caso, o problema de fadiga pode ser classificado como de fadiga de alto ciclo já que as tensões a nível macroscópico são bem menores às tensões de escoamento e o número de ciclos de carregamento é da ordem dos milhões (Pravia, 2003). Na Figura 2.14 ilustra-se uma fratura por fadiga em um eixo. Salienta-se que na região superior (clara) ocorreu a nucleação e propagação estável de trincas (denominadas “marcas de praia”), devido a alteração na amplitude e/ou frequência de aplicação da carga. A maior área da fratura é comporta pela região radial (“nervuras”), indicando que o material teve o comportamento frágil, no arranchamento final por tração, de maneira catastrófica.



**Figura 2.14** – Fratura por fadiga (detalhe das “marcas de praia” propagação estável da trinca)

Segundo Cardoso (2007), alguns fatores que afetam a vida útil à fadiga de pontes metálicas são:

- Amplitude das tensões existentes nos elementos: amplitude de tensões é a diferença entre a tensão máxima e a tensão mínima em que a ponte está submetida. Quanto maior esta diferença, maior será os riscos de um colapso por fadiga. Este risco aumenta ainda mais quando há inversão de tensões, com a mudança de tensões de tração e de compressão em um mesmo ciclo;
- Razão entre cargas (  $R$  ) =  $F_{\min}/F_{\max}$  ou  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  , quanto maior o  $R$  pior para o material.
- Corrosão: a presença de corrosão por pites provoca concentrações de tensões o que propicia o surgimento de fadiga em elementos da ponte;
- Microestrutura do material: homogeneidade, tamanho dos grãos, etc.;
- Amortecimento: em virtude das elevadas amplitudes de tensões em pontes ferroviárias, o amortecimento das pontes, diminui a amplitude das tensões e

por consequência aumenta a vida útil da estrutura melhorando, assim, o conforto, uma vez que os deslocamentos também diminuem.

Não é objeto deste trabalho um aprofundamento sobre este tema que é bastante complexo. No entanto, o assunto foi incluído neste, como um tipo de patologia das quais as pontes estão submetidas, principalmente as pontes ferroviárias onde a amplitude dos carregamentos cíclicos é maior, logo, a relevância em se mencionar as características básicas dessa patologia.

### 2.4.3 Patologias em ligações

A Norma NBR 8800 (ABNT, 2008) destaca que as ligações metálicas consistem em elementos de ligação, como enrijecedores, chapas de ligação, cantoneiras e consolos, e meios de ligação, como parafusos, barras redondas rosqueadas e pinos.

Dentre os citados acima, a ênfase está no estudo dos rebites e suas patologias, visto, ser este, o principal meio de ligação do estudo de caso deste trabalho.

Antes da utilização da conformação por técnica soldagem, as ligações em pontes eram feitas invariavelmente com rebites, sendo os mais utilizados os de diâmetros de 3/4" e 7/8", e em menor escala os de 1/2", 5/8" e 1". De acordo com a resistência mecânica do aço usado na fabricação, os rebites podem ser normais ou de alta resistência mecânica, este último sendo também conhecido como especial. As pontes ferroviárias possuem rebites normais em quase sua totalidade. Há muito tempo, as ligações rebitadas caíram em desuso para pontes novas, sendo ainda empregadas no reforço de estruturas, onde deseja-se conservar o mesmo modelo construtivo em obras históricas, bem como na recuperação de peças (ALMEIDA, 1999).

Segundo Cardoso (2007), mesmo sendo, por muito tempo o único meio de ligação utilizado em estruturas metálicas, a Norma NBR 8800/2008 é omissa em relação aos rebites. Uma vez que há no país muitas obras construídas com esta tipologia de ligação e não há nenhuma orientação sobre procedimentos normativos para restaurá-los.

Desta forma, conhecer o comportamento deste tipo de ligação é fundamental no processo de restauração destas estruturas com mais de um século de existência.

Em seu trabalho, Cardoso (2007) apresenta quatro tipos básicos de patologias em ligações rebitadas que são citadas a seguir:

- Corrosão de ligações: na região de contato entre dois perfis montados e ligados por rebites, forma-se naturalmente uma fresta, por onde inicia o processo de

corrosão por frestas, conforme descrito anteriormente. E ainda corrosão galvânica entre o rebite e as chapas;

- Afrouxamento de ligações: essa patologia gera um grave problema nas pontes ferroviárias construídas com ligações rebitadas. Como consequência deste fenômeno, observa-se o deslizamento de ligações. Em pontes treliçadas, este acontecimento é bastante preocupante, pois após o deslizamento de alguns elementos de ligação, há uma nova configuração de cargas, introduzido acréscimo de tensão em outros elementos de ligação, o qual não fora projetado para suportá-las. Nos casos extremos pode ocorrer o cisalhamento de rebites e/ou parafusos, o que pode ocasionar deformações excessivas de elementos estruturais ou até mesmo o colapso total da estrutura. O afrouxamento de ligações ocorre devido à vibração excessiva, causada pela carga móvel originária do tráfego de trens;
- Colapso de ligações: ocorre por erros de projeto ou ainda por aumento da tensão empregada aos mesmos, seja por mudanças na intensidade do carregamento ou por diminuição da área da seção transversal provocada pela corrosão. As verificações a serem feitas em projetos de ligações rebitadas são praticamente as mesmas realizadas para ligações parafusadas trabalhando por contato, ou seja, cisalhamento do fuste do rebite, rasgamento da chapa de ligação, esmagamento do rebite, esmagamento do chapa, dobramento do rebite e rasgamento global da chapa de ligação;
- Patologias decorrentes da montagem: devido às dificuldades impostas durante a rebitagem, muitos dos problemas patológicos encontrados neste tipo de ligação têm origem na própria execução da estrutura ou em recuperações posteriores. Pode ocorrer, por exemplo, folga total ou parcial entre o rebite e a chapa, conformação inadequada da cabeça do rebite, variação no diâmetro do furo ou ainda, incompatibilidade de furos entre as chapas.

Atualmente, a utilização de rebites em ligações de pontes não é comum. A dificuldade na execução deste tipo de ligação foi o fato preponderante para sua extinção. O surgimento do parafuso estrutural facilitou de forma significativa o trabalho de montagem de ligações, substituindo de vez o antigo meio de ligação. A Figura 2.15 ilustra, no próprio estudo de caso, a ligação rebitada em evidência.



**Figura 2.15** - Ligação rebitada na Ponte da Estação de Ouro Preto

## **2.5 Estudo da Modelagem Estrutural de Pontes Metálicas**

Segundo Cardoso (2007), a avaliação da integridade estrutural de uma ponte é realizada sempre que houver dúvidas sobre a capacidade de carga da estrutura. Existem basicamente dois métodos de avaliação de pontes antigas sujeitas à patologias: a análise numérica e a prova de carga.

O método numérico é o mais utilizado atualmente, principalmente após o advento dos computadores no cálculo estrutural e o desenvolvimento de “softwares” de análise (análise matricial, elementos finitos, elementos de contorno, entre outros).

A escolha da forma de análise depende das particularidades de cada ponte, dos recursos disponíveis para a equipe de avaliação, do fator econômico (custo/benefício) e da importância da obra. É importante ressaltar que seja qual for a metodologia escolhida, a eficácia na avaliação está inteiramente ligada a uma inspeção de campo bem realizada, em que seja reproduzida com fidelidade a geometria da ponte, seção transversal de cada elemento estrutural, sobrecarga atuante e características químicas e mecânicas do material (CARDOSO, 2007).

### **2.5.1 Avaliação Estrutural – Prova de Carga**

Na revisão literária deparou-se com a falta de uma normatização específica sobre provas de carga em pontes metálicas e para tal se fez o estudo baseado na Norma NBR 9607 (ABNT,2012) – Prova de carga em estruturas de concreto armado e protendido – Procedimento e na Norma NBR 15307 (ABNT,2006) – Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas – Procedimento.

A Norma NBR 9607 (ABNT,2012) define Prova de Cargas como um conjunto de atividades destinadas a analisar o desempenho de uma estrutura através da medição e controle de efeitos causados pela aplicação de ações externas de intensidade e natureza previamente estabelecidas.

Pode-se dividir as provas de carga em duas categorias a saber: estática e dinâmica. Tal divisão se dá em função do tipo de carregamento utilizado e dos resultados a serem obtidos. A Norma NBR 15307 (ABNT,2006) afirma matematicamente que para o comportamento estático de uma estrutura, ou seja, considerando a frequência igual a zero obtêm-se como resposta estática o produto da força aplicada pelo inverso da rigidez, ou seja, o comportamento estático é um caso particular do dinâmico. Ainda sobre o carregamento atuante, Gonçalves (1992) enfatiza que este deve ser previamente definido para que nenhum dos estados limites máximos sejam atingidos nas provas de carga de pontes em operação.

Neste tipo de avaliação estrutural usa-se o carregamento real a que a estrutura estará submetida com objetivo de verificar o comportamento estrutural da ponte, validar estudos teóricos (analíticos e/ou numéricos) e verificar a segurança da estrutura, quando houver dúvidas se a capacidade portante e o modelo estrutural adotado são confiáveis (CARDOSO, 2007). Segundo Gonçalves (1992), as provas de carga realizadas em pontes com algum tipo de deterioração também fornecem subsídios quanto ao comportamento global da estrutura. Logo, os resultados precisam ser cuidadosamente avaliados pelo engenheiro calculista, pois problemas locais podem comprometer a segurança global da estrutura.

As etapas que merecem atenção na execução de uma prova de carga, ainda segundo o mesmo autor, são as elencadas abaixo:

- Realizar uma inspeção preliminar para que todos os aspectos relativos à instrumentação da ponte sejam avaliados pela equipe responsável pela prova de carga;
- Definição do programa de medições: definir os pontos de medição (deslocamentos, deformações e giros), preparar o cronograma com estimativas

de horas a serem dispendidas na preparação dos pontos bem como a previsão da duração do ensaio;

- Equipamentos de medição: definir os equipamentos de medição (defletômetros, clinômetros, sistemas de transferência de leituras, indicadores de deformação, termômetros, etc.) em função das medições a serem efetuadas e do tempo útil para o ensaio;
- Estudo das propriedades dos materiais: realizar ensaios em laboratório de corpos de prova quando surgir dúvidas sobre as características mecânica do material da ponte;
- Carregamento: o posicionamento do carregamento externo em uma ponte é um fator extremamente importante nos procedimentos de ensaio assim como o valor nominal do mesmo. É recomendado que o “trem tipo de ensaio” seja posicionado de forma a se obter solicitações máximas nos elementos que estão sendo estudados;

Segundo Gonçalves (1992, *apud* CARDOSO, 2007, p. 89) os resultados da prova de carga para pontes metálicas indicam reservas de resistência maiores do que as obtidas nos cálculos teóricos, devido ao comportamento tridimensional e à redundância da estrutura decorrente da redistribuição dos esforços, muitas vezes não considerados no cálculo teórico. A simples verificação de uma reserva de resistência deve ser acatada pelo engenheiro calculista, porém avaliada criticamente. Alguns fenômenos que não são estudados na prova de carga, como por exemplo a fadiga, pode vir a ocorrer e acarretar o colapso de uma estrutura.

## 2.5.2 Avaliação Estrutural – Método Numérico

Segundo Cardoso (2007), a avaliação estrutural consiste em simular em computadores as condições de carregamentos atuantes na estrutura, onde se deve conhecer a priori, as propriedades mecânicas do material utilizado na construção da obra, bem como saber as propriedades geométricas dos elementos que a compõe. Logo é possível aplicar os carregamentos na estrutura e obter informações como esforços, deslocamentos, tensões atuantes em cada seção dos elementos estruturais e os resultados obtidos são utilizados para a verificação estrutural segundo normas vigentes.

A grande dificuldade deste método consiste no rigor com que se trata as variáveis da análise. Itens fundamentais desse processo como a escolha da hipótese de cálculo, a elaboração do modelo estrutural, a determinação das características físicas e geométricas dos

elementos estruturais podem ser tratadas com maior ou menor rigor por diversos motivos. Fatores como o tempo, a disponibilidade de recursos ou a complexidade de se determinar certos parâmetros podem fazer com que a análise seja conduzida de maneira mais simplificada impondo aí fatores de segurança maiores e levando a resultados menos confiáveis. Esse rigor que será determinado item a item pelo profissional responsável levará a um custo x benefício para se obter resultados satisfatórios dentro de limites aceitáveis em todas as esferas da análise (financeira, temporal, etc.).

Sob o ponto de vista técnico, o ideal seria que todas as pontes fossem avaliadas com uma inspeção mais detalhada. A opção entre recuperar ou substituir poderá ser escolhida através de uma pequena reserva de resistência mecânica obtida através de um modelo de cálculo mais preciso e da análise das condições reais de uma ponte Gonçalves (1992, *apud* CARDOSO, 2007, p. 88).

## **2.6 Estudo da Metodologia de Inspeção**

O cuidado com a manutenção de uma estrutura é um dos principais aspectos na vida útil da mesma Gonçalves (1992), afirma que um programa de manutenção eficiente e bem planejado propicia não só o prolongamento da vida útil da ponte, como também evita gastos desnecessários para a recuperação ou reforços em pontes deterioradas.

A inspeção deve considerar as particularidades de cada ponte, a tipologia estrutural, os elementos de ligação, as características dos materiais utilizados, a idade e o tipo de tráfego. No Brasil existem pontes centenárias, com materiais, esquemas estáticos e construtivos da época assim como pontes recém construídas. Logo, as pontes ferroviárias são exemplos reais para a observação destas particularidades (GONÇALVES, 1992).

Segundo Gonçalves (2007), o inspetor será sempre um engenheiro diplomado e registrado no Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA) e no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA), com comprovado conhecimento em construção e manutenção de ponte, ou com treinamento específico para esta finalidade. Cabe ainda ressaltar que uma equipe de inspeção é formada por um inspetor, técnicos e auxiliares, sendo de responsabilidade do inspetor orientar os trabalhos realizados. Gonçalves (1992) complementa bem ao enfatizar que “o engenheiro deve saber ‘onde’, ‘como’ e ‘quando’ observar uma ponte para uma boa inspeção”.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) propõe a divisão das inspeções de pontes em cinco categorias distintas, sendo: inspeção cadastral, inspeção

rotineira, inspeção especial, inspeção extraordinária e inspeção intermediária. Como é o foco deste trabalho, são abordadas abaixo com suas metodologias e peculiaridades a inspeção cadastral e a inspeção especial.

### 2.6.1 Inspeção Cadastral

A inspeção cadastral, segundo o Manual do DNIT, é a primeira inspeção da obra e deve ser efetuada imediatamente após sua conclusão ou assim que ela se incorpora no sistema viário; é também a inspeção que deve ser feita quando há uma alteração sensível na configuração da obra, tais como alagamentos, acréscimo de comprimento, reforços, mudança no sistema estrutural.

A inspeção cadastral é uma inspeção que deve ser amplamente documentada não só pelos próprios dados da inspeção, mas também conter o projeto completo e todos os informes construtivos disponíveis (DNIT, 2004).

Segundo CARDOSO (2007), em pontes antigas, quando os projetos não estão disponíveis, o cadastro inicia-se pelo levantamento histórico em arquivos públicos e privados que apreciem informações relevantes sobre a mesma; também nesta etapa é realizado “in loco” o levantamento da geometria da estrutura, onde são contempladas informações sobre dimensões, seção transversal dos elementos, sistema estrutural, estado de conservação dos elementos, tipologia da estrutura e fundação, quantidade de linhas ferroviárias, sobrecarga existente, etc.

A qualidade da inspeção cadastral está diretamente ligada à abrangência e precisão no levantamento dos dados no campo englobando aí toda a ponte (infra, meso e superestrutura); também deve ser realizado intenso registro fotográfico além do preenchimento da ficha de inspeção cadastral (vide anexo A).

### 2.6.2 Inspeção Especial

A inspeção especial consiste de uma investigação mais detalhada com o objetivo de avaliar a integridade física da ponte, onde são obtidas informações sobre a situação real nas condições de utilização, bem como permitir a verificação da segurança de parte ou de toda a obra. É este tipo de inspeção que é realizado sempre que é gerado alguma dúvida sobre as reais condições de estabilidade e segurança da estrutura. Desta forma a inspeção especial precede e fornece todas as informações necessárias para a verificação estrutural, através de análise numérica ou prova de carga (CARDOSO, 2007).

O manual de inspeção de pontes do DNIT (2004), preconiza que a inspeção especial deverá ser efetuada em intervalos máximos de cinco anos em todas as pontes consideradas excepcionais seja pelo seu porte, seja pelo seu sistema estrutural ou pelo seu comportamento problemático ou ainda sempre que julgado necessário por uma inspeção rotineira previamente realizada. A existência de acidentes que acarretem danos aos elementos estruturais é um exemplo que leva a realização de uma inspeção dessa natureza.

Os relatório e documentário fotográfico são atípicos, mas minuciosos e amplos, e ficarão a critério do engenheiro inspetor, porém sempre obedecendo a estrutura básica das fichas padronizadas da inspeção rotineira (anexo B).

### 2.6.3 Do planejamento à execução das inspeções em pontes metálicas

O manual de inspeção de ponte, publicado pelo DNIT (2004), recomenda que a inspeção de uma ponte deve ser administrada de forma metódica e organizada, de forma a assegurar que todos os elementos estruturais sejam examinados; apropriadas fichas de inspeção garantem este procedimento. O documentário fotográfico deve ser abrangente e completo: um mínimo de seis fotografias deve abranger vista superior, vista inferior, vistas laterais, aparelho de apoio, ligações, etc.; anomalias eventualmente encontradas nos elementos estruturais devem ser cuidadosamente examinadas e registradas para que possa ser investigada sua causa. Havendo possibilidade, a ponte deve ser verificada durante a passagem da composição férrea, para que possam ser observados os níveis de vibrações e deformações nos elementos estruturais.

Segundo Gonçalves (2007), na fase de planejamento para a realização de qualquer modalidade de inspeção descrita acima, devem ser definidos e efetuados os seguintes procedimentos: seleção da equipe técnica de trabalho, atribuição das funções e responsabilidades a cada membro da equipe, definição dos equipamentos coerentes com a metodologia de inspeção a ser adotada e determinação da sequência e das prioridades da inspeção.

De acordo com o DNIT (2004), uma inspeção geralmente se inicia pelo estrado e elementos da superestrutura, dando continuidade pela infraestrutura. Entretanto, há um conjunto de fatores que necessitam ser considerados quando se planeja a sequência de inspeção de uma ponte, incluindo: tipologia da ponte, estado geral de conservação, modalidade de inspeção a ser realizada, complexidade da mesma, dimensão da estrutura, condições de tráfego e procedimentos especiais.

Gonçalves (2007) ressalta a importância e atenção que se deve ter em obra anteriormente inspecionada. Nesse caso devem ser analisadas todas as informações contidas nos relatórios, com atenção especial a fatores importantes, tais como: elementos estruturais que estejam em monitoramento devido às anomalias leves já encontradas, registro de reparos realizados anteriormente, dados geotécnicos e hidrológicos do trecho, projetos de montagem e detalhamento da ponte e outros documentos por ventura existentes.

A execução “in loco” da inspeção da ponte deve ser abrangente a todos os elementos da obra, atentando-se sempre que possível, às diretrizes estabelecidas na etapa de planejamento. O sucesso da inspeção se dá quando os trabalhos realizados no escritório na fase de planejamento são validados com as informações devidamente levantadas no trabalho de campo. A inspeção deve ser focada, porém não restrita, aos seguintes itens detalhados pelo DNIT (2004), abaixo:

- Verificação dos acessos: defeitos nos acessos podem causar impactos indesejáveis na entrada e saída da ponte; anotar a existência ou não de placas de transição e, em caso positivo, atestar o estado de conservação e funcionamento da mesma; verificar as juntas existentes entre os acessos e a ponte, saídas de aterros e etc.;
- Geometria e condições viárias: verificar o alinhamento da obra, se há deformações ou vibrações consideradas excessivas, se o tráfego flui livremente e em segurança e se há locais adequados para o trânsito de pedestres; em casos de pontes em curva, verificar se há superlargura e superelevação; em pontes sobre rios navegáveis e viadutos deve ser conferido se os gabaritos horizontais e verticais atendem as condições de uso e se existe proteção, junto aos pilares, para choques de veículos ou embarcações;
- Regiões de encontros e fundações: os encontros devem ser examinados para verificar a possível existência de trincas resultantes de assentamentos, desalinhamentos ou desaprumos ocasionados por pressões dos aterros de acesso; anomalias em estruturas de concreto e corrosão de armaduras devem ser pesquisadas; se a fundação for do tipo direta e superficial deve atentar-se para a ocorrência de erosões ou descalçamentos (um exame adequado só poderá ser efetuado em época de águas baixas); já se tratando de fundação profunda como estacas, devem ser anotados os comprimentos livres, sem

confinamento, e o estado das estacas, principalmente no trecho de variação do nível d'água;

- Verificação dos cursos d'água: avaliar se a seção de vazão disponível é suficiente, se detritos e materiais suspensos escoam livremente nos períodos de cheia e se há manifestação ou indícios de erosão; no caso de ocorrência de assoreamento ou retenção de materiais por apoios intermediários, deve ser providenciado a desobstrução do curso d'água; verificar a integridade e o funcionamento de enrocamentos ou outras proteções que possam existir nas margens e nos apoios intermediários;
- Apoios intermediários: os pilares maciços, parede ou isolados, bem como as vigas de contraventamento, devem ser cuidadosamente examinados para verificar a possível existência de degradação do concreto e corrosão das armaduras; importantes e perigosas são as trincas e quebras de canto nos topos dessas estruturas e a possível degradação de armaduras e do próprio concreto nas bases das mesmas;
- Aparelhos de apoios: essas estruturas são sensivelmente afetadas por anomalias estruturais, tais como recalques de apoios, mau funcionamento de certos tipos de juntas de dilatação, movimentação de estrados, choques de materiais flutuantes nas grandes cheias; por isso todos os aparelhos de apoio devem ser cuidadosamente examinados para atestar seu estado e seu funcionamento; os apoios metálicos devem estar isentos de ferrugem, bem lubrificados e com chumbadores em bom estado; já os aparelhos de apoio elastoméricos não devem ser achatados, com faces abauladas e muito distorcidos;
- Juntas de dilatação: deve-se inspecionar as juntas de dilatação, anotando-se a tipologia, verificando sua integridade e capacidade de vedação e, ainda, se está funcionando livremente, não prejudicadas por acúmulo de detritos; deve-se medir suas aberturas simultaneamente com o registro da temperatura ambiente;
- Sinalização e instalações de utilidade pública: verificar e registrar a existência ou não de placas de sinalização na entrada da ponte e de sinalização da pista, quando aplicável; existindo dutos de utilidade pública, quase sempre feitos após o projeto de construção da ponte, verificar se estão bem fixados, se existe vazamentos de água ou gás e se os mesmos estão bem isolados e protegidos;

- Elementos da superestrutura: já, de certa forma abordados acima, devem ser verificados os aparelhos de apoio, o vigamento principal e secundário, ancoragens e canalizações de utilidade pública, cada item com suas particularidades;
- Elementos da infraestrutura: inspeção detalhada nos pilares, gabaritos vertical e horizontal, proteção dos pilares, fundações e cortinas ancoradas, encontros e proteções de taludes.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os materiais e métodos empregados nesse trabalho. Fez – se a seguinte divisão abaixo.

#### 3.1 Análises e Ensaios Laboratoriais e *in loco*

Após etapa cadastral e de conhecimento do trecho em estudo foi realizada a caracterização dos materiais constituintes do estudo de caso desta dissertação empregando-se ensaios laboratoriais e pesquisas de cunho científico na literatura existente.

As características mecânicas e a composição química do aço utilizado na “Ponte da Estação de Ouro Preto” foram obtidas por ensaios e análises em amostras retiradas de material proveniente de uma ponte do trecho que não pertence à concessão da Cia Vale, mas que apresenta as mesmas características da ponte estudada. Tal validação foi feita embasada nos registros históricos datando a construção das mesmas em datas próximas e analisando os resultados obtidos com os resultados apresentados pelo Eng. Manoel Gonçalves Cardoso no seu estudo de caso realizado com material da “Ponte da Barra de Ouro Preto” em 2007. Isso se fez necessário, pois não houve intervenção na mesma com a substituição de elementos estruturais de onde se pudesse coletar amostras para fazer ensaios de natureza destrutiva. Com a literatura, ensaios e resultados já obtidos por Cardoso em seu trabalho na “Ponte da Barra”, pode-se validar os dados obtidos e usá-los como representativos para o estudo de caso.

##### 3.1.1 Propriedades mecânicas dos metais

As propriedades mecânicas de materiais são determinadas pela execução de experimentos de laboratório que replicam, tanto quanto possível, as condições de trabalho. Fatores a serem considerados incluem a natureza da carga aplicada e a sua duração, bem como as condições ambientais.

O comportamento mecânico do material reflete a correlação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada. Importantes propriedades mecânicas são resistência mecânica, dureza, ductilidade e rigidez (CALLISTER, 2008).

##### 3.1.2 Composição química do material

Obteve-se a composição química do material utilizado na “Ponte da Estação” no Laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

(DEMET) da Escola de Minas/UFOP, empregando-se a técnica de espectrometria de emissão óptica, a amostra utilizada foi retirada da cantoneira representativa citada acima.

A Tabela 3.1 mostra o valor da média de três resultados da composição química do aço utilizado na “Ponte da Estação”, Ouro Preto/MG.

De acordo com a composição química do material em análise refere-se a um aço com baixíssimo teor de carbono (denominado “aço doce”). Pode-se afirmar que se trata de um aço ABNT 1005 que é um aço que possui, dentre outros valores, teor de carbono  $\leq 0,05\%$ , Manganês entre 0,35 e 0,55% e Silício abaixo de 0,06%. Destacam-se baixos teores de manganês e silício; no entanto, o enxofre é relativamente alto o que indica ser um aço “antigo”.

**Tabela 3.1** – Composição química (% em massa) do aço analisado.

<b>Composição Química</b>	
<b>Elemento</b>	<b>(% em massa)</b>
Ferro (Fe)	99,2
Carbono (C)	0,059
Manganês (Mn)	0,386
Enxofre (S)	0,082
Fósforo (P)	0,035
Silício (Si)	0,008
Outros	0,095

### 3.1.3 Análise metalográfica

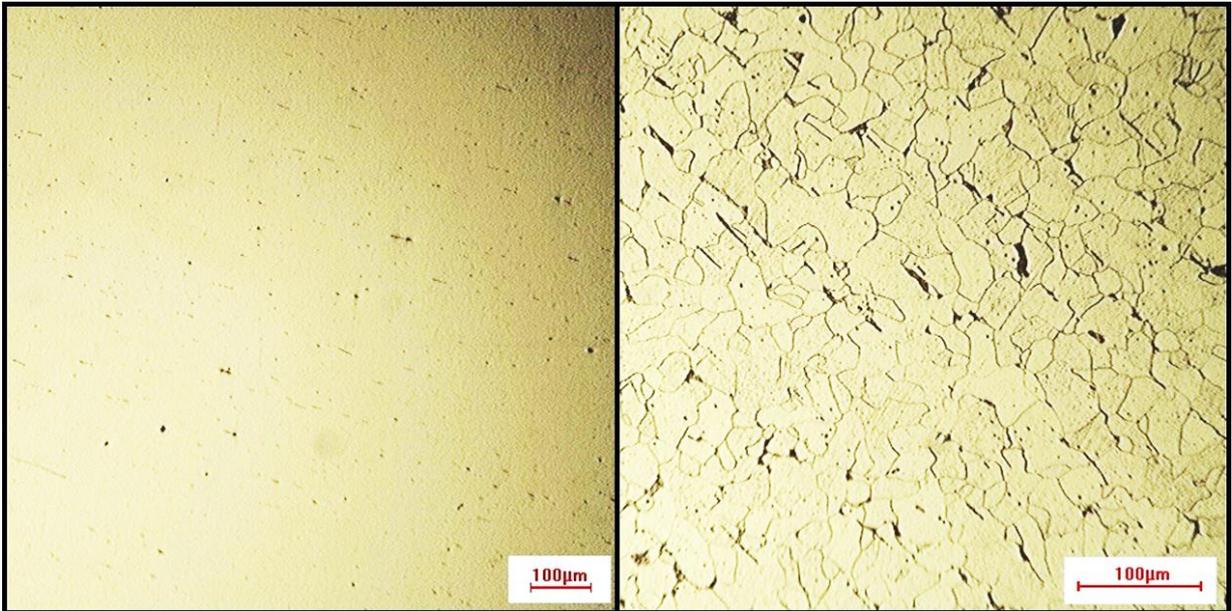
A caracterização metalográfica foi realizada no Laboratório de Metalografia do DEMET da Escola de Minas/UFOP. Uma amostra obtida da cantoneira citada foi preparada para tal caracterização. A preparação da amostra começa com o desbaste e segue para etapa de lixamento a úmido. A seguir, foi polida com alumina de 1 $\mu$ m e com pasta de diamante de 1/4 $\mu$ m. A fotomicrografia do material foi feita sem ataque químico no microscópio ótico e posteriormente, para realçar a microestrutura, se fez o ataque da amostra com reagente químico Nital 2% (ácido nítrico + álcool etílico) e feita nova análise no microscópio.

A Figura 3.1 mostra algumas etapas do preparo da amostra sendo essas: (a) lixamento à úmido; (b) polimento; (c) ataque com Nital 2%; (d) análise no microscópio.



(a) (b) (c) (d)  
**Figura 3.1** – Etapas de preparação da amostra para análise metalográfica.

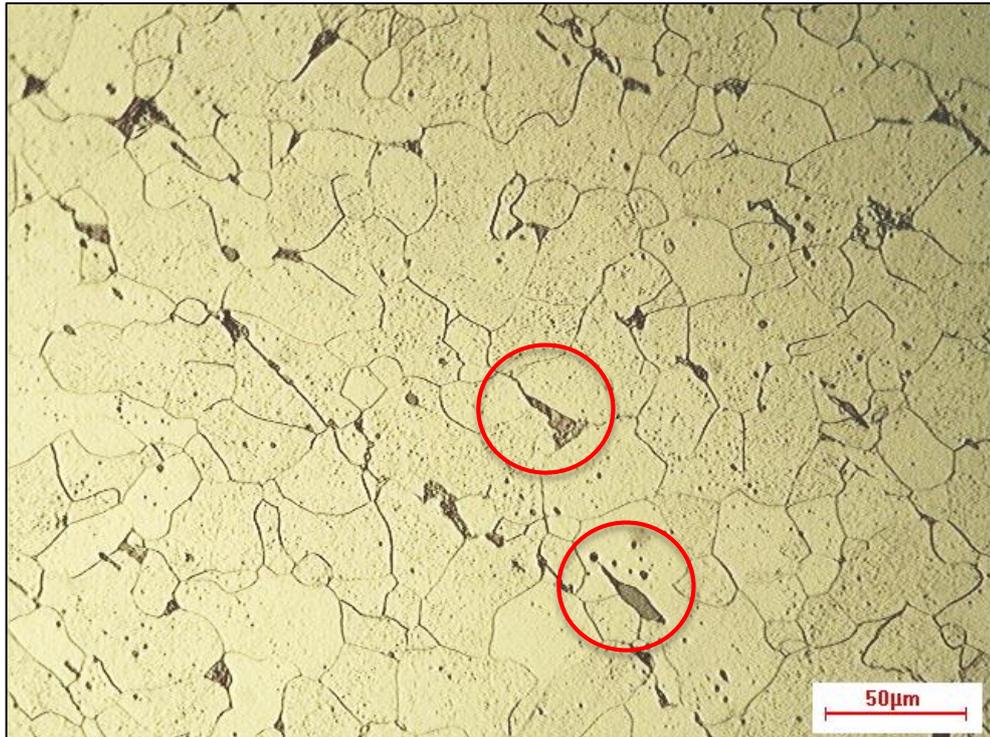
Observa-se na Figura 3.2 a microestrutura do material estudado sem ataque químico e na Figura 3.3 após o ataque com Nital a 2%.



**Figura 3.2** – Micrografia da amostra sem ataque; 100x.

**Figura 3.3** – Micrografia da amostra com ataque Nital 2%; 200x.

A caracterização metalográfica (Figura 3.3) permite observar a presença marcante da fase ferrita (região clara) o que implica em um aço de baixa resistência mecânica, e o constituinte perlita em pequena fração volumétrica (regiões escuras na Figura 3.4). Nota-se também a presença de inclusões alongadas provavelmente de sulfeto de manganês (MnS).



**Figura 3.4** – Micrografia da amostra com ataque Nital 2%; 400x.

### 3.1.4 Ensaio de dureza

Uma propriedade mecânica importante que foi considerada é a dureza, que é uma medida da resistência de um material à deformação plástica local (por exemplo, um pequeno indentamento). Os ensaios de dureza são realizados mais frequentemente do que qualquer outro ensaio mecânico por razões como:

São simples e baixo custo: normalmente, nenhum corpo de prova especial precisa ser preparado e o equipamento de ensaio é relativamente baixo custo;

- O ensaio pode ser não-destrutivo: o corpo de prova nem é fraturado nem excessivamente deformado; uma pequena impressão é a única deformação;
- Outras propriedades mecânicas podem, com frequência, ser estimadas a partir dos dados da dureza, tal como o limite de resistência à tração.

Segundo Callister (2008) em ensaios de dureza Brinell um penetrador esférico duro é forçado para dentro da superfície do metal a ser ensaiado. O número de dureza Brinell, HB, é uma função tanto da magnitude da carga quanto do diâmetro da impressão resultante. Esse diâmetro é então medido com um microscópio especial e convertido em um número HB adequado com o auxílio de uma tabela; essa técnica é empregada apenas em uma única escala.

O limite de resistência do elemento estrutural foi determinado indiretamente empregando-se do ensaio de dureza Brinell e na preparação da amostra foi utilizada a mesma metodologia empregada na análise metalográfica descrita acima.

A Figura 3.5 apresenta a amostra após realização do ensaio de dureza Brinell.



**Figura 3.5** – Amostra após ensaio de dureza Brinell (setas nas indentações realizadas)

Foram realizadas seis endentações aleatórias, mas devidamente separadas, na superfície do material. Os dados obtidos no ensaio, o cálculo da média e o desvio padrão da dureza Brinell (HB) constam na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** – Valores de dureza Brinell (HB), média e desvio padrão

Informações obtidas (em kgf/mm <sup>2</sup> )							
HB <sub>1</sub>	HB <sub>2</sub>	HB <sub>3</sub>	HB <sub>4</sub>	HB <sub>5</sub>	HB <sub>6</sub>	Média HB	Desvio padrão
108	108	110	105	108	108	108	1,6125

Como já caracterizado na análise metalográfica e na composição química o material sendo de baixo carbono resulta em baixo relativamente baixo de dureza.

### 3.1.5 Ensaio de tração

Um dos ensaios mecânicos mais comuns de tensão-deformação é conduzido sob tração. O ensaio de tração pode ser usado para determinar várias propriedades mecânicas de materiais que são importantes em um projeto. Uma amostra é deformada, usualmente até à fratura por uma carga de tração que é aumentada gradativamente e que é aplicada

uniaxialmente ao longo do eixo maior de um corpo de prova (CP). A Figura 3.6 apresenta uma região da máquina de ensaio universal preparada com o corpo de prova a ser ensaiado.



**Figura 3.6** - Máquina de ensaios mecânicos – DEMET/UFOP

Da cantoneira em estudo foi retirado material suficiente para a produção de seis CPs que, posteriormente, foram ensaiados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do DEMET/UFOP segundo Norma NBR 6152 (ABNT,2002). A referida normatização especifica o método de ensaio de tração em materiais metálicos e define as propriedades mecânicas que podem ser determinadas à temperatura ambiente. A Figura 3.7 ilustra (a) um CP padrão usado no ensaio. Destaca-se o aspecto corroído do material.



**Figura 3.7** – Corpo de prova usado no ensaio de tração conforme Norma (NBR 6152/ABNT 2002)

A Tabela 3.3 apresenta o resultado do ensaio de tração realizado nos CPs.

**Tabela 3.3** – Ensaio de tração em amostra do aço da PEOP.

Corpo de Prova	CP	$L_0$	$L_f$	$\Delta L$	$F_{m\acute{a}x}$	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$\sigma_y$	$\sigma_u$
		(mm)	(mm)	(mm)	(kgf)	(%)	(MPa)	(MPa)
	1	15,0	19,5	4,5	390	30,0	278,4	397,7
	2	15,0	19,0	4,0	550	26,7	345,9	428,2
	3	15,0	21,0	6,0	612	40,0	325,8	398,9
	4	15,0	19,0	4,0	592	26,7	339,9	448,5
	5	15,0	19,5	4,5	540	30,0	339,2	433,9
	6	15,0	20,0	5,0	552	33,3	364,9	429,8

Constata-se assim que os valores médios mais o seu desvio padrão obtidos e usados como parâmetros de entrada na análise numérica foram os seguintes:

- Limite de escoamento  $\sigma_y = 332\text{MPa} \pm 29,33$
- Limite de resistência à tração  $\sigma_u = 423\text{MPa} \pm 20,31$
- Variação do comprimento na parte útil  $\Delta L = 4,7\text{mm} \pm 0,75$
- Deformação específica máxima  $\epsilon_{m\acute{a}x} = 31\% \pm 5,02$

### 3.1.6 Difração de raios X

O fenômeno da difração ocorre quando uma onda encontra uma série de obstáculos regularmente espaçados, que são capazes de espalhar a onda, e têm espaçamentos que são comparáveis em magnitude ao comprimento de onda (CALLISTER,2008).

Ainda segundo Callister (2008) uma técnica comum de difração emprega uma amostra em pó ou policristalina consistindo de muitas partículas finas e randomicamente orientadas que são expostas à radiação-X monocromática. Cada partícula do pó é um cristal, e a existência de um grande número deles com orientações randômicas assegura que algumas partículas estão apropriadamente orientadas de tal maneira que todo conjunto de planos cristalográficos possíveis estarão disponíveis para difração.

Dentre vários usos, os raios X são usados para investigações químicas qualitativas e quantitativas além de determinação de tensões residuais e de tamanho de cristais.

Foi coletado produto de corrosão de três elementos distintos para tal análise. A amostra 1 é referente à cantoneira usada no ensaio de tração mencionado no item 1. A amostra 2 consiste no material extraído da cantoneira da própria “Ponte da Estação” assim como a amostra 3 que foi coletada em uma das vigas da parte inferior do referido estudo de caso. Por se tratar de uma análise não destrutiva, foi possível coletar amostras de produtos de corrosão em elementos estruturais que não foram substituídos na ponte, mantendo assim a completa

integridade da mesma. Tais amostras foram preparadas no Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Engenharia Geológica da Escola de Minas na UFOP onde foi realizado a análise. A Figura 3.8 ilustra o preparo das amostras que basicamente consiste em (a) coleta, identificação e pesagem das amostras, (b) desintegração da amostra e (c) peneiramento para obter a amostra pulverizada que irá ser analisada.



**Figura 3.8** – Etapas para realização do ensaio de raios X.

Com os resultados obtidos pode-se observar a presença de produtos de corrosão a base de óxido e hidróxido de ferro (magnetita –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e goetita -  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), consequência natural da corrosão de ligas ferrosas em ambientes oxidantes.

## 3.2 Análise Estrutural da Ponte da Estação de Ouro Preto

A verificação da capacidade estrutural da Ponte da Estação de Ouro Preto empregando-se o estudo numérico foi realizada utilizando “software” SAP2000 apropriado para este fim.

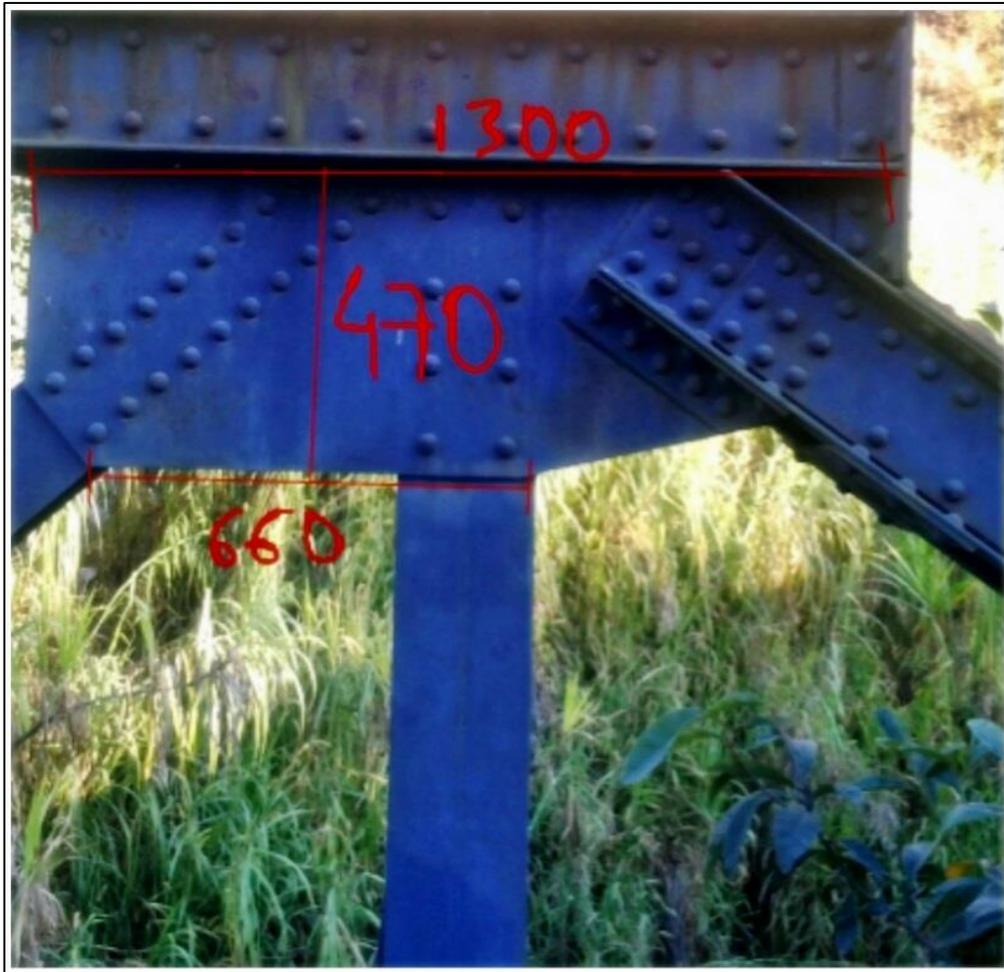
Etapas como o levantamento “in loco” das características geométricas da ponte, modelagem da estrutura no “software” aplicando as devidas condições de contorno, estudo e aplicação do carregamento e das propriedades do material foram desenvolvidas para a correta avaliação numérica da estrutura e obtenção de resultados satisfatórios.

### 3.2.1 Determinação das propriedades geométricas

O levantamento da geometria dos elementos da ponte foi feito após intenso registro fotográfico e estudo das condições de segurança do local. Foi avaliado os riscos da execução desse trabalho, a necessidade e uso de equipamentos de segurança, as condições ambientais e climáticas da época e a não utilização do trecho pela companhia administradora do trem turístico que liga as cidades de Ouro Preto a Mariana.

A já referida ponte em estudo não estava sofrendo nenhum tipo de intervenção ou manutenção no período, logo não houve substituição de nenhum elemento ou melhoria em suas condições de utilização.

As condições de trabalho foram favoráveis para a adequada medição e os equipamentos de segurança individuais como capacete, óculos de segurança, perneira, botas de couro e calça comprida foram utilizados para garantir o sucesso do trabalho. Prancheta com caneta aliados ao recurso tecnológico de fotografia e edição de imagem no próprio local por um “tablet” permitiu a identificação do elemento com suas respectivas medidas para posterior modelagem computacional. A Figura 3.9 exemplifica o uso do recurso tecnológico citado.



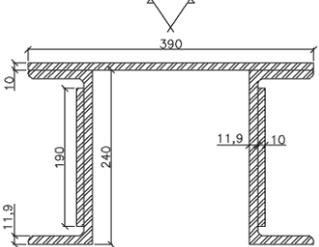
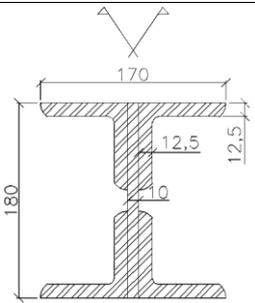
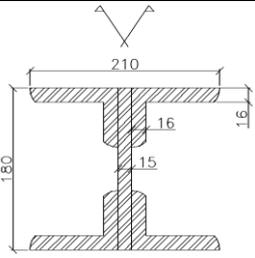
**Figura 3.9** - Levantamento da geometria dos elementos da Ponte da Estação de Ouro Preto

O comprimento e largura dos perfis da estrutura foram determinados com trena metálica de precisão milimétrica, ao passo que a espessura foi determinada com o uso de um paquímetro mecânico com precisão de 0,05mm. A necessidade de se utilizar um equipamento

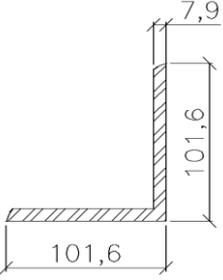
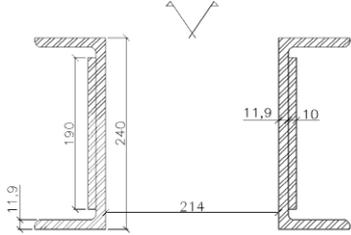
com maior precisão na determinação da espessura das chapas que compunha os perfis se deu em virtude das outras dimensões não sofrerem reduções significativas em decorrência da corrosão, enquanto, a espessura é extremamente afetada, e em alguns casos a redução é tão grande que pode até mesmo perfurar o perfil.

A Tabela 3.4 apresenta os perfis que compõem a Ponte da Estação de Ouro Preto (PEOP), com dimensões em milímetros e propriedades geométricas em centímetros (área **A**, momento de inércia **I**, raio de giração **r** e módulo elástico de resistência à flexão **W**). Os momentos de inércia  $I_x$  e  $I_y$  foram calculados em relação ao eixo baricêntrico.

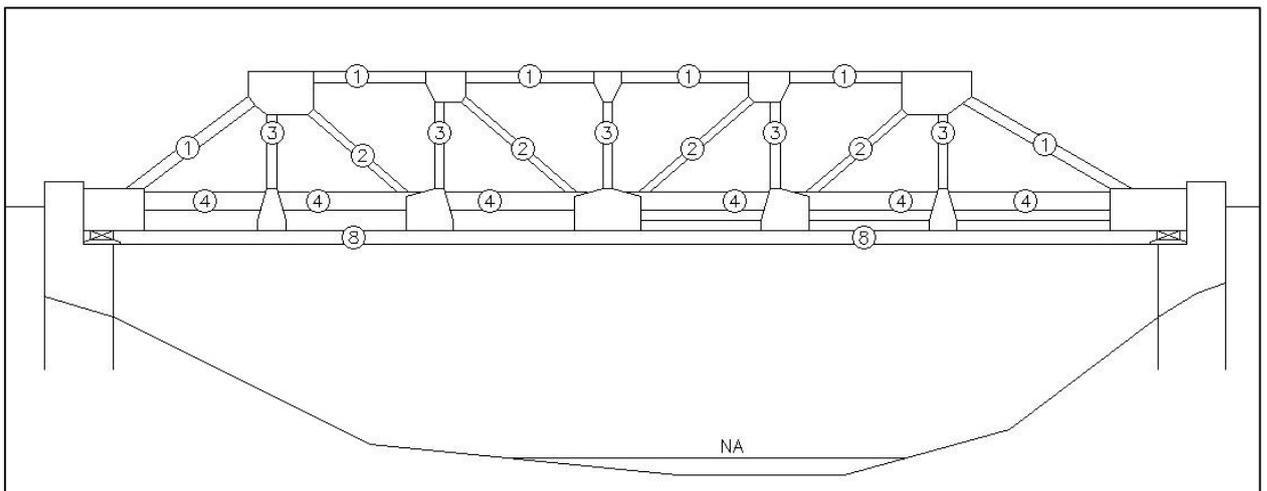
**Tabela 3.4** – Propriedades geométricas dos perfis da Ponte da Estação de Ouro Preto

Nº	Perfil (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	$I_x$ (cm <sup>4</sup> )	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	$r_x$ (cm)	$r_y$ (cm)	$W_x$ (cm <sup>3</sup> )	$W_y$ (cm <sup>3</sup> )
1		170,99	13345,03	27294,38	8,83	12,63	898,27	1399,71
2		91,75	4070,97	1071,94	6,66	3,42	452,33	126,11
3		121,40	5773,07	2557,47	6,90	4,59	641,45	243,57

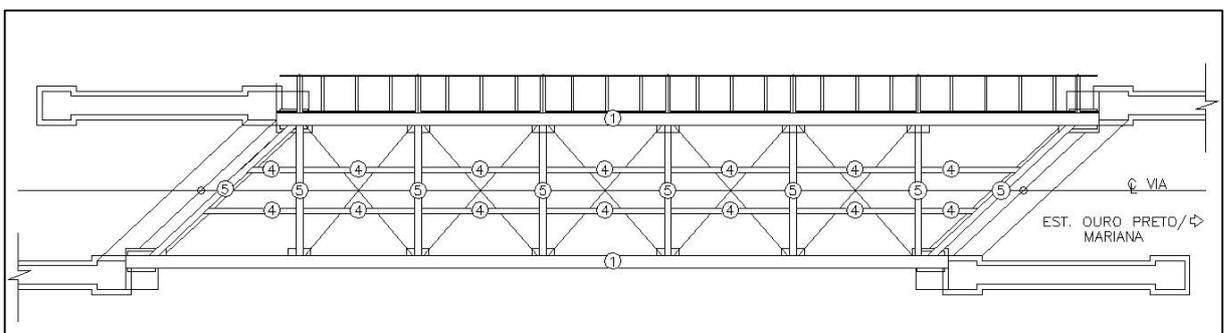
4		118,96	24369,17	1058,72	14,31	2,98	1282,59	141,16
5		174,47	131386,37	1927,01	27,44	3,32	3700,98	183,53
6		13,59	81,50	81,50	2,45	2,45	14,38	14,38

7		15,43	153,95	153,95	3,16	3,16	21,01	21,01
8		149,59	11068,38	26477,69	8,60	8,60	821,29	1357,83

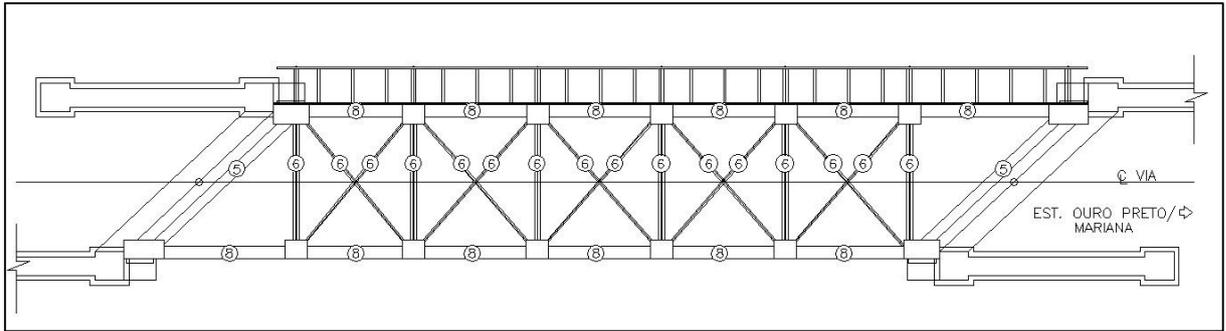
Nas Figuras 3.10 a 3.13 apresenta-se, de forma esquemática, a localização dos elementos estruturais cujas propriedades foram apresentadas na Tabela 3.4



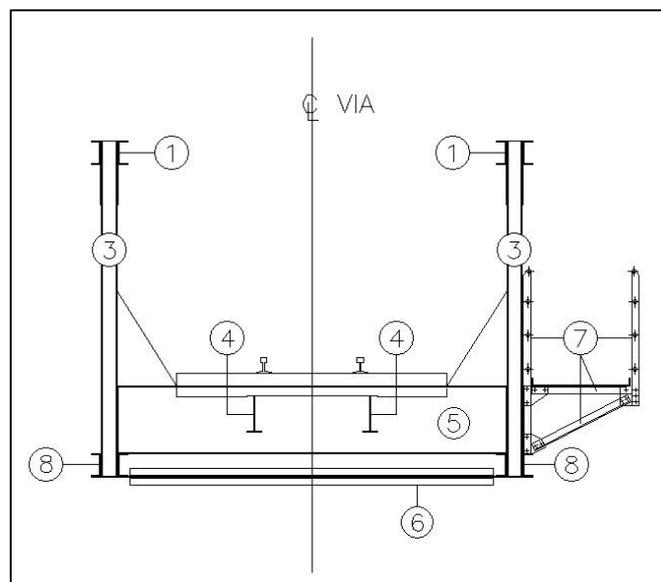
**Figura 3.10** – Representação esquemática em vista frontal, localizando os elementos estruturais da Ponte da Estação de Ouro Preto



**Figura 3.11** - Representação esquemática em vista superior, localizando os elementos estruturais da Ponte da Estação de Ouro Preto



**Figura 3.12** - Representação esquemática em vista inferior, localizando os elementos estruturais da Ponte da Estação de Ouro Preto



**Figura 3.13** - Representação esquemática da seção transversal típica, localizando os elementos estruturais da Ponte da Estação de Ouro Preto

### 3.2.2 Condições de Carregamento da Estrutura

Cada carregamento incidente na estrutura foi avaliado de forma individual e posteriormente aplicado ao modelo estrutural no “software” em estudo. Com todos os carregamentos corretamente discretizados partiu-se para a elaboração de combinações de carregamento, isto é, o estudo das possibilidades de incidência simultânea de vários carregamentos na estrutura para se verificar a situação mais desfavorável para a mesma.

As particularidades de cálculo de cada carregamento estão abordadas nos itens seguintes.

### 3.2.2.1 Combinação de cargas

A estrutura foi calculada para quatro tipos de combinações (com suas variações em função de coeficientes previstos na Norma NBR8800 (ABNT,2008) visando o estudo das variações de esforços solicitantes atuantes em situações que podem ocorrer ao longo da vida útil da estrutura. O carregamento descrito como trem-tipo (TT) engloba todas as ações diretamente associadas a passagem da composição férrea, sendo essas o efeito do trem tipo propriamente prescrito por norma para o TB-240, o impacto lateral (Fh) e a força longitudinal (Fl). As quatro combinações estudadas são descritas abaixo:

- COMB 1 – Nesse estudo foi verificado a ação do trem-tipo (TT) atuando concomitantemente com a carga permanente (CP) e o peso próprio da estrutura (PP);
- COMB 2 – Nessa combinação de cargas foi adotado os mesmos itens presentes na COMB 1 e adicionado o efeito da carga de vento (VT);
- COMB 3 – Foi estudado o efeito das cargas presentes na COMB 1 e adicionado o efeito da sobrecarga (SC);
- COMB 4 – A última combinação visa o estudo para o caso de ocorrência de todos os carregamentos atuando simultaneamente, ou seja, a ação do trem-tipo, peso próprio, carga permanente, sobrecarga e ação do vento na estrutura.

Segundo a Norma NBR8800 (ABNT,2008) deve-se adotar coeficientes para ponderar os efeitos atuantes dos carregamentos, pois nem todos atuam simultaneamente e com sua magnitude total. Logo as combinações possíveis e analisadas no “software” SAP2000 foram:

- Para COMB 1 tem-se:
  - COMB 1A:  $1,4 * PP + 1,25 * CP + 1,5 * TT$
- Para COMB 2 tem-se:
  - COMB 2A:  $1,4 * PP + 1,25 * CP + 1,5 * TT + 1,5 * 0,0 * VT$
  - COMB 2B:  $1,4 * PP + 1,25 * CP + 1,5 * 0,5 * TT + 1,5 * VT$
- Para COMB 3 tem-se:
  - COMB 3A:  $1,4 * PP + 1,25 * CP + 1,5 * TT + 1,5 * 0,6 * SC$
  - COMB 3B:  $1,4 * PP + 1,25 * CP + 1,5 * 0,5 * TT + 1,5 * SC$

- Para COMB 4 tem-se:
  - COMB 4A:  $1,4 * PP + 1,25 * CP + 1,5 * TT + 1,5 * 0,6 * SC + 1,5 * 0,0 * VT$
  - COMB 4B:  $1,4 * PP + 1,25 * CP + 1,5 * SC + 1,5 * 0,5 * TT + 1,5 * 0,0 * VT$
  - COMB 4C:  $1,4 * PP + 1,25 * CP + 1,5 * VT + 1,5 * 0,5 * TT + 1,5 * 0,6 * SC$

Cada carregamento citado acima segue detalhadamente explicado e calculado na sequência deste trabalho.

### 3.2.2.2 *Peso próprio da estrutura*

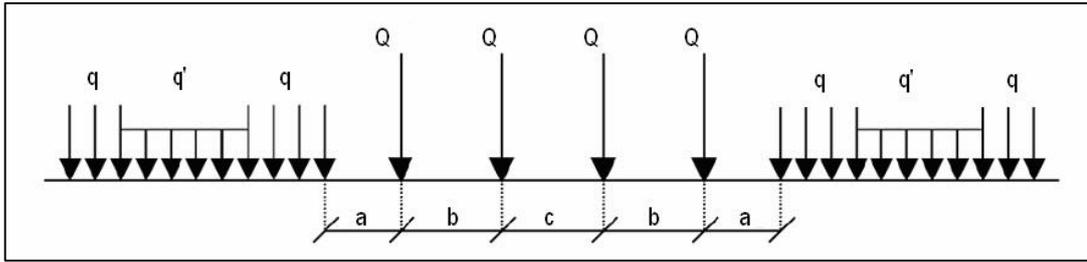
O peso próprio é obtido pelo produto da massa dos elementos estruturais e de outros elementos não estruturais como trilhos e dormentes pela aceleração da gravidade. Em todas as combinações o peso próprio é aplicado uniformemente distribuído no eixo local do elemento estrutural.

### 3.2.2.3 *Carga móvel em ponte ferroviária*

A Norma NBR 7189 (ABNT 1985) estabelece quatro tipos de trem-tipos:

- TB 170: vias exclusivas ao transporte de passageiros em regiões metropolitanas.
- TB 240: verificação de estabilidade e projeto de reforço de obras existentes;
- TB 270: ferrovias sujeitas a transporte de carga em geral;
- TB 360: ferrovias sujeitas a transporte de minérios de ferro e carregamentos equivalentes.

A designação dos trem-tipo é feita pela carga dos eixos mais pesados da locomotiva. A Figura 3.14 apresenta, de forma genérica, como é feita a distribuição dos pesos com seus devidos espaçamentos.



**Figura 3.14** - Características gerais do trem-tipo de ponte ferroviária.

**FONTE:** Norma NBR 7189 (ABNT,1985)

O detalhamento da Figura 3.14 com os valores característicos referentes a cada trem-tipo é o que segue na Tabela 3.5:

**Tabela 3.5** – Valor das constantes apresentadas na Figura 4.14.

TB	Q (kN)	q (kN/m)	q' (kN/m)	a (m)	b (m)	c (m)
170	170	25	15	1,0	2,5	5,0
240	240	80	15	1,0	2,0	2,0
270	270	90	15	1,0	2,0	2,0
360	360	120	20	1,0	2,0	2,0

Sendo:

Q = Carga concentrada por eixo;

q = Carga distribuída linearmente na via férrea;

q' = Carga distribuída linearmente no passeio.

No cálculo da “Ponte da Estação” foi adotado o trem tipo TB 240, em virtude do caráter de verificação da estabilidade de uma obra já existente.

#### 3.2.2.4 Impacto vertical – efeito da ação dinâmica

Segundo Pfeil (1983, *apud* CARDOSO,2007, p.113) devido à movimentação das cargas úteis sobre as pontes, as solicitações, provocadas pelos seus respectivos pesos, são acrescidas de efeitos dinâmicos, comumente denominados efeitos de impacto. Nas pontes ferroviárias, esse impacto é provocado por alguns fatores:

- Pela ação dinâmica do deslocamento das cargas;
- Pelas irregularidades nos trilhos e nas rodas;
- Pela inclinação lateral variável das locomotivas e vagões e;
- Pelas forças de inércia das rodas motoras.

O efeito do impacto é representado por um coeficiente multiplicador, denominado coeficiente de impacto ( $\varphi$ ).

Também pode ser observado que a ação dinâmica é mais acentuada em pontes metálicas do que em pontes de concreto (já que a última possui maior carga permanente), e por outro lado constata-se que o efeito dinâmico é maior em pontes ferroviárias (maior carga móvel) do que em pontes rodoviárias (CATAI, 2005).

A Norma NBR 7187 (ABNT,2003) preconiza que o valor de tal coeficiente deve ser calculado de acordo com a Equação 3.1.

$$\varphi = 0,001*(1600 - 60 l + 2,25l) \text{ maior ou igual a } 1,2 \quad (3.1)$$

Onde:  $l$  = medida do vão da ponte em metros. Em caso de vigas em balanço, o valor de entrada  $l$  a ser empregado na expressão, corresponde a duas vezes o comprimento da mesma. Em elementos contínuos, cada tramo terá seu coeficiente de impacto em função de seu respectivo vão teórico. Sendo assim, para a “Ponte da Estação” que possui um vão teórico único de 23,45m, foi utilizado  $\varphi = 1,3622$ .

### 3.2.2.5 Impacto lateral ( $Fh$ )

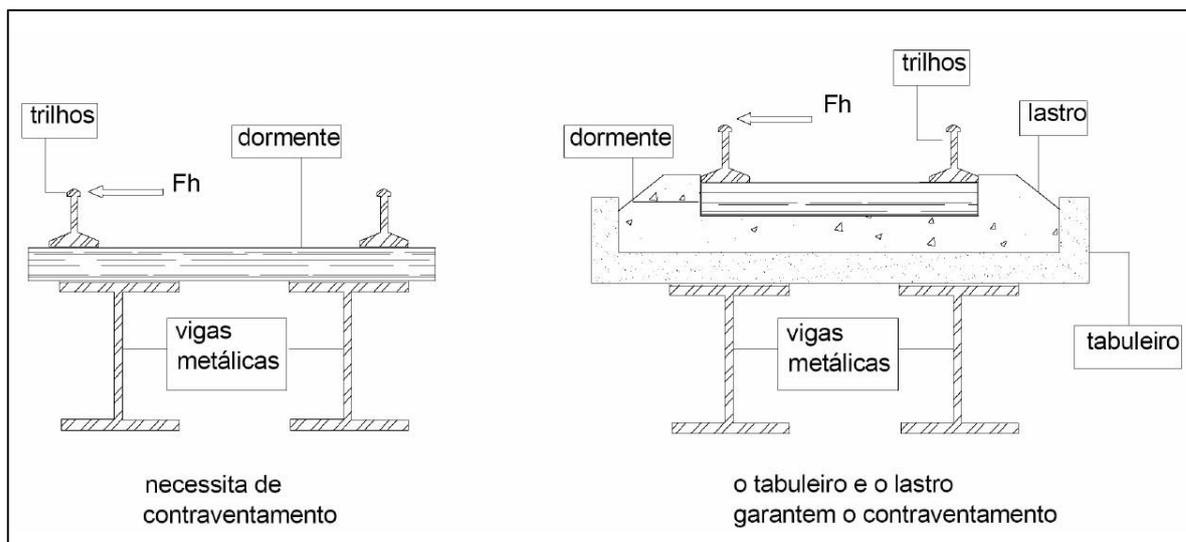
Segundo Catai (2005), o impacto lateral é considerado em pontes ferroviárias, visto que o trem possui movimento não retilíneo, e devido a presença de folgas entre o friso das rodas e o trilho, ocorrem impactos entre si.

O efeito de impacto lateral foi considerado aplicando-se de uma força igual a 20% do eixo mais pesado, atuando no topo do trilho e normal ao eixo de linha na posição mais desfavorável para o elemento em estudo. Os valores desta força são apresentados na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6** – Valores do impacto lateral para as quatro categorias de trens-tipo

TB	170	240	270	360
$Fh$ (kN)	34	48	54	72

A Figura 3.15 ilustra a situação mais desfavorável para a aplicação do impacto lateral na estrutura.



**Figura 3.15** – Representação esquemática da força devido ao impacto lateral.

Fonte: CATAI, 2005

### 3.2.2.6 Força centrífuga ( $F_c$ )

Segundo Pfeil, a força centrífuga é aplicada em pontes ferroviárias em curva, no entanto, não se soma o efeito de força centrífuga ao impacto lateral, devendo considerar dentre as duas, apenas a que produzir o efeito mais desfavorável à estrutura. Para efeito de cálculo, a força centrífuga ( $F_c$ ) é considerada no centro de gravidade do trem, suposto 1,60m acima do topo do trilho, com valor calculado em porcentagem da carga móvel atuante acrescida de impacto.

Como o estudo de caso deste trabalho é uma ponte reta no sentido longitudinal de sua estrutura, não se considerou o efeito da força centrífuga nos cálculos, atentando-se apenas impacto lateral citado.

### 3.2.2.7 Força longitudinal ( $F_l$ )

A Norma NBR 7187 (ABNT, 2003) prevê que se adote uma força longitudinal que é provocada por frenagem ou aceleração da locomotiva sobre os trilhos, sendo aplicada sem efeito de impacto no topo do trilho.

Para o cálculo da força longitudinal considera-se, dentro da situação mais desfavorável para a estrutura, 15% da carga móvel ou 25% da soma dos eixos motores.

Para o caso específico da “ Ponte da Estação” os valores calculados foram os seguintes:

- 15% da carga móvel, gerando uma carga longitudinal de 330kN;

- 25% da soma dos eixos motores, gerando uma carga longitudinal de 240kN.

Conclui-se que o valor adotado nos cálculos foi de 330kN para a força longitudinal.

### 3.2.2.8 Ação do vento

A Norma NBR 7187 (2003) não tem um procedimento específico para a consideração da ação do vento nesse tipo de estrutura estudado, apenas recomenda que esta ação seja determinada segundo a Norma Brasileira NBR 6123 (1988), referente a Ação do Vento em Edifícios. Levando-se em consideração a elevada diferença entre a geometria da ponte e dos edifícios, este trabalho adotou as recomendações da antiga Norma NB-2 (1961), onde a ação de vento é considerada uniformemente distribuída, horizontalmente e normal ao eixo da ponte. Esta norma também prevê a aplicação da ação do vento em duas situações:

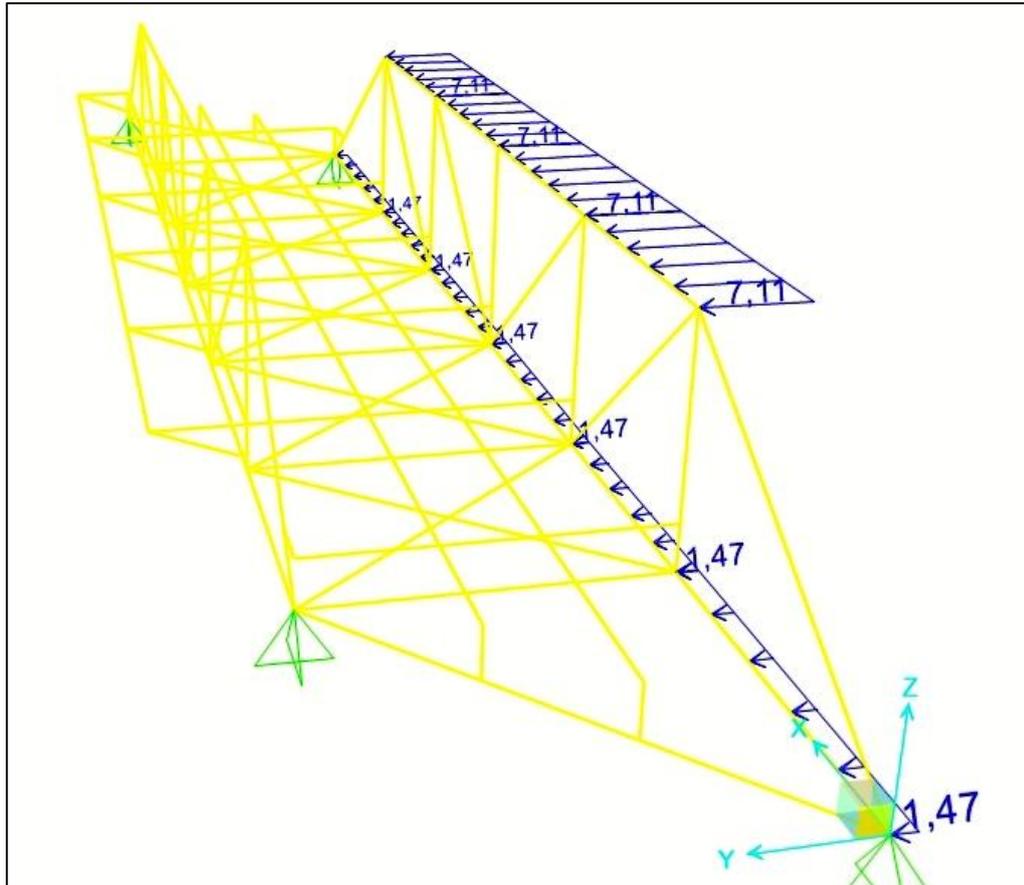
- Ponte descarregada, neste caso considera-se como superfície de incidência do vento a projeção da estrutura sobre o plano normal à direção do vento, onde é aplicado uma tensão distribuída de 1,5kN/m<sup>2</sup>.
- Ponte carregada, deste caso deve ser acrescido à superfície de incidência do vento um painel de 3,5m, referente a incidência do vento na lateral da composição férrea. A tensão distribuída para esta situação é de 1,0kN/m<sup>2</sup>.

Os valores calculados segundo recomendações acima para a “Ponte da Estação” são os apresentados na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7** – Valores da ação do vento para a “Ponte da Estação”.

Solicitações oriundas do vento		
	Ponte Carregada (kN/m <sup>2</sup> )	Ponte Descarregada (kN/m <sup>2</sup> )
Banzo Inferior da Estrutura	1,47	0,98
Banzo Superior da Estrutura	7,11	0,98

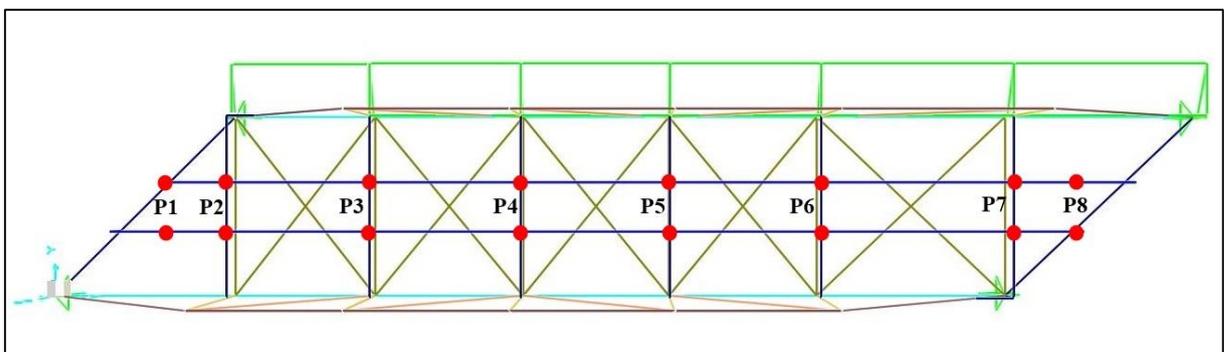
A Figura 3.16 representa a ação característica desse carregamento na estrutura carregada.



**Figura 3.16** - Aplicação da ação do vento na estrutura da “ Ponte da Estação”

### 3.2.2.9 Deslocamento da carga móvel

O efeito do carregamento móvel foi simulado aplicando o trem-tipo (TB-240 da Norma NBR 7189), em oito posições, com espaçamentos variados um dos outros. Tal espaçamento foi, a princípio, definido como sendo o cruzamento das vigas intermediárias com a viga eixo onde segue o trilho do trem. Além desses pontos, o início e o final da estrutura foram pontos analisados como se observa nos pares de pontos enumerados de forma crescente de P<sub>1</sub> até P<sub>8</sub>. A Figura 3.17 ilustra tal aplicação.



**Figura 3.17** – Representação de aplicação do carregamento móvel na “ Ponte da Estação”

O diagrama da Figura 3.18 ilustra a variação do posicionamento do trem-tipo ao longo da ponte.

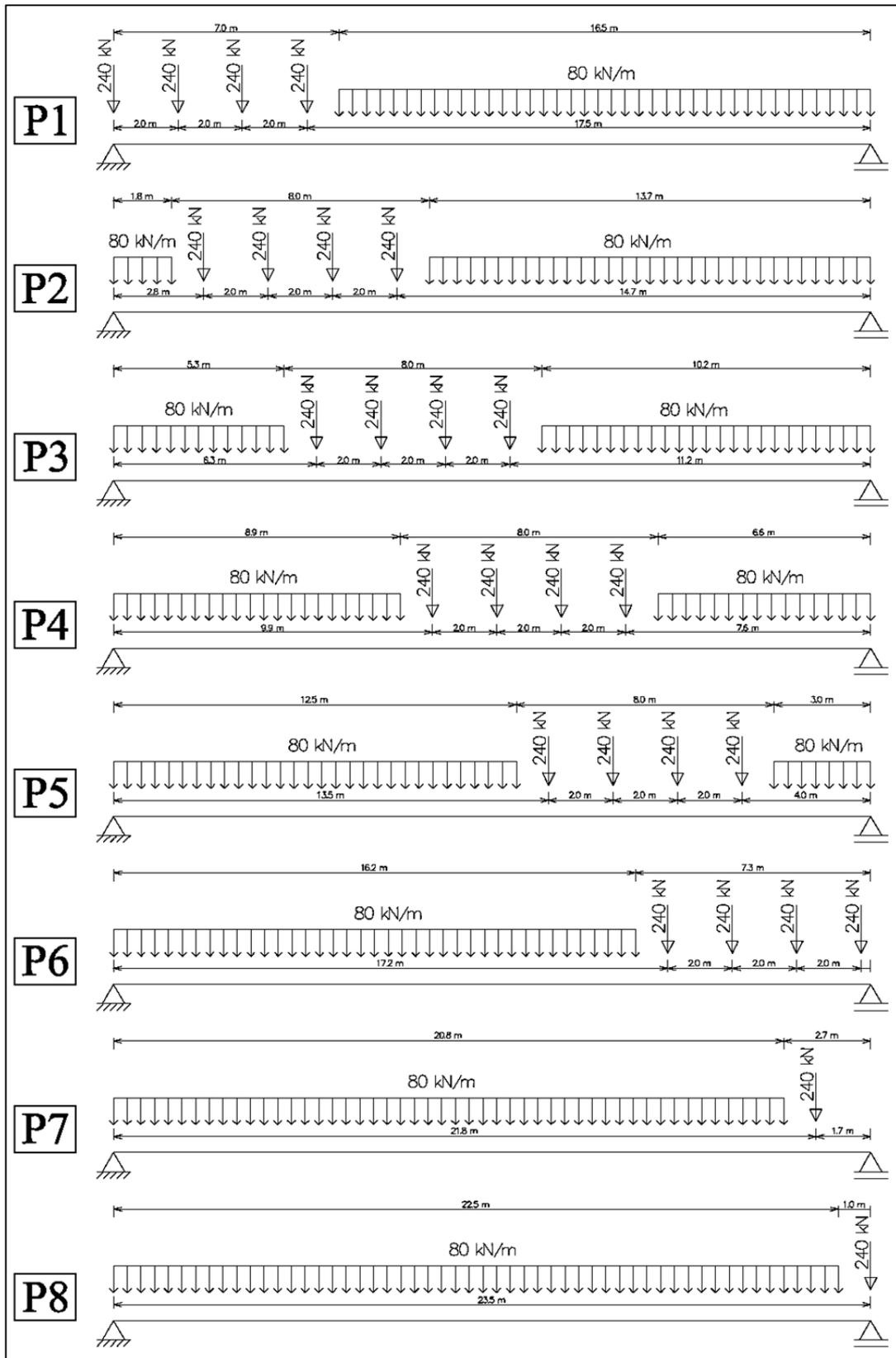


Figura 3.18 – Variação do posicionamento do trem-tipo ao longo da “Ponte da Estação”

### 3.2.3 Modelagem da “Ponte da Estação” no “software” SAP2000

Em virtude da carga oriunda da passarela de pedestre (posicionada apenas em uma das laterais da ponte) foi necessário fazer uma análise numérica tridimensional. Os modelos numéricos apresentados neste trabalho são propostos para a análise numérica com simulação via “software SAP2000”.

A ponte analisada é formada por perfis compostos, na sua grande maioria formados por associação de cantoneiras laminadas e associação de cantoneiras com chapas. Desta forma foi necessário definir cada perfil como sendo um perfil genérico, e com uma nomenclatura diferente da que é utilizada usualmente. Cada perfil foi discretizado no “software” com as medidas reais para uma análise da situação atual da estrutura, ou seja, não foi considerado os perfis como sendo novos, isentos de perda de material devido ação do tempo. Os perfis são unidos utilizando-se rebites como elemento de ligação.

Para melhor representação das ligações rebitadas, foi considerado os banzos superior e o inferior, como um elemento contínuo.

Com base nas características do aço apresentadas anteriormente, o “software” foi configurado com os seguintes parâmetros de entrada: Módulo de elasticidade  $E = 205\text{GPa}$ ; Coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ ; Coeficiente de dilatação térmica  $\alpha = 11 \times 10^{-6} \text{m/m}^\circ\text{C}$ ; Peso específico  $\gamma = 78,5 \text{kN/m}^3$ . Também foram observadas todas as características pertinentes à geometria dos perfis citadas anteriormente.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho e uma discussão sobre os mesmos. Embora alguns resultados dos ensaios laboratoriais já foram apresentados no capítulo anterior, os mesmos foram apresentados visto o seu caráter como parâmetro de entrada para a análise numérica. Os demais resultados deste trabalho são apresentados de forma sistemática a seguir.

### **4.1 Cadastro das O.A.E. da Ferrovia Turística Cultural**

O cadastro das pontes, pontilhões e viadutos que compõem a ferrovia turística entre as cidades históricas de Ouro Preto e Mariana/MG foi realizado embasado, segundo CARDOSO (2007), em arquivos e documentos antigos referentes à construção da ferrovia. Nesse sentido as cadernetas manuscritas e as missivas pertencentes à coleção Caetano Lopes Jr., engenheiro responsável pela construção da ferrovia em foco, forneceram várias informações pertinentes à construção das pontes e dos desafios técnicos e administrativos ocorridos durante a construção do citado trecho da ferrovia.

Os levantamentos realizados “in loco” das características geométricas das pontes, e os relatórios gentilmente cedidos pela Companhia Vale – responsável pelo trecho, completaram as pesquisas para efetuar o cadastro das pontes.

### **4.2 Inspeção das Pontes da Ferrovia Turística Cultural entre Ouro Preto e Mariana/MG**

Neste item apresentam-se as fichas de Inspeção Cadastral das pontes contidas no trecho ferroviário em estudo. Tais fichas foram realizadas primeiramente por CARDOSO (2007), porém constata-se a ausência das fichas dos pontilhões intermediários contidos no trecho. Após etapas de manutenção para reativação da linha turística, não houve novos estudos nem revisões de tais informações até o presente trabalho. As fichas apresentadas são atualizadas e atentas às condições do trecho neste ano. Deu-se maior ênfase às pontes denominadas “Ponte da Estação de Ouro Preto” e “Ponte da Barra”, uma vez que estas obras apresentaram maior número de detalhes construtivos.

O trabalho de inspeção foi complementado por vasto registro fotográfico atualizado, conforme previsto no Capítulo 3, além do levantamento minucioso das características

geométricas das pontes, que foram reproduzidas em desenhos feitos em ambiente CAD (cotas em centímetros quando não indicadas).

#### 4.2.1 Inspeção na PEOP (Ponte da Estação de Ouro Preto/MG – km 0,0)

Esta ponte é a mais antiga dentre as pontes do trecho ferroviário em estudo. Os relatórios de inspeção apontam para uma estrutura em estado de conservação regular, dispensando reforço estrutural, porém necessita intervenções para melhorar as condições da estrutura. As fichas cadastrais foram preenchidas de acordo com as recomendações contidas no Anexo “A” deste trabalho.

##### 4.2.1.1 *Ficha de Inspeção Cadastral da PEOP*

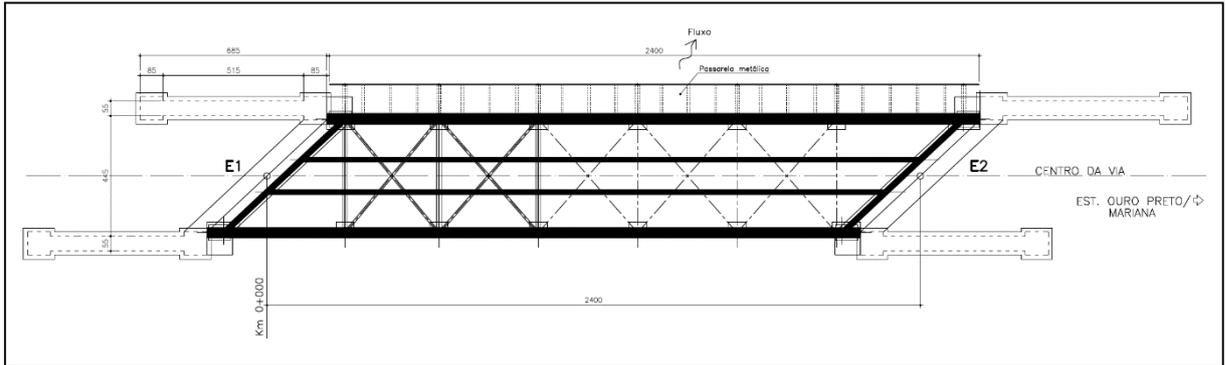
Os resultados da Inspeção Cadastral para esta ponte estão apresentados na Tabela 4.1 preenchida conforme modelo disposto no Anexo A.

Tabela 4.1 – Ficha de Inspeção Cadastral da PEOP

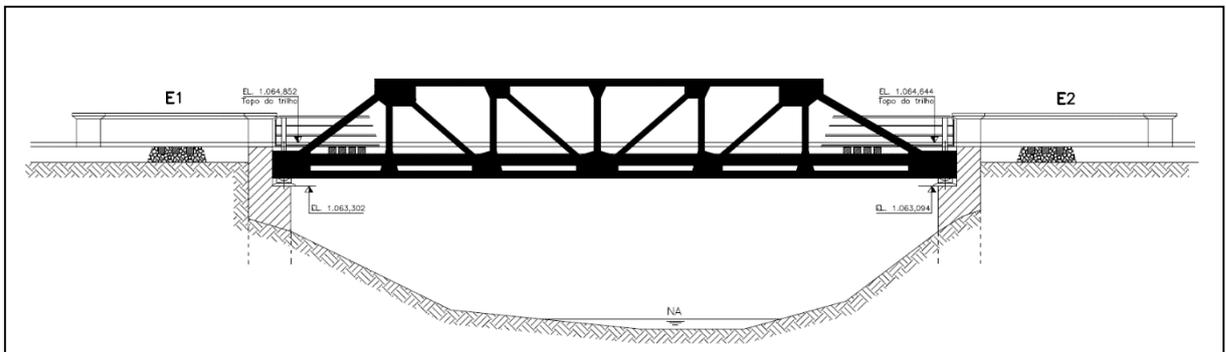
3 CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL																														
MATERIAIS / SEÇÃO TIPO																														
COMPONENTE	MATERIAL (CÓDIGO) (VER TABELA 5.A)	SEÇÃO TIPO (CÓDIGO) (VER TABELA 6.A)																												
ESTRADO	AC	VT																												
VIGAS PRINCIPAIS	AC	VT																												
PILARES	PD	2CI																												
FUNDAÇÕES	IG	IG																												
<b>TABELA 1.A - TIPOS DE APARELHOS DE APOIO</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cód.</th> <th>Descrição</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>CR</td><td>Cremalheira</td></tr> <tr><td>NP</td><td>Elastométrico (Neoprene)</td></tr> <tr><td>FR</td><td>Fixo metálico com Rotula de Aço</td></tr> <tr><td>FM</td><td>Fixo Metálico (Chapa de Aço)</td></tr> <tr><td>RM</td><td>Rolo Metálico</td></tr> <tr><td>RA</td><td>Rolo Metálico com articulação superior</td></tr> <tr><td>PD</td><td>Pêndulo Metálico</td></tr> <tr><td>PC</td><td>Pêndulo em Concreto Armado</td></tr> <tr><td>FR</td><td>Articulação Freyssinet</td></tr> <tr><td>CH</td><td>Placa de Chumbo</td></tr> <tr><td>LP</td><td>Ligação Pórtico</td></tr> <tr><td>TE</td><td>Tipo especial</td></tr> <tr><td>NI</td><td>Não Informado</td></tr> </tbody> </table>			Cód.	Descrição	CR	Cremalheira	NP	Elastométrico (Neoprene)	FR	Fixo metálico com Rotula de Aço	FM	Fixo Metálico (Chapa de Aço)	RM	Rolo Metálico	RA	Rolo Metálico com articulação superior	PD	Pêndulo Metálico	PC	Pêndulo em Concreto Armado	FR	Articulação Freyssinet	CH	Placa de Chumbo	LP	Ligação Pórtico	TE	Tipo especial	NI	Não Informado
Cód.	Descrição																													
CR	Cremalheira																													
NP	Elastométrico (Neoprene)																													
FR	Fixo metálico com Rotula de Aço																													
FM	Fixo Metálico (Chapa de Aço)																													
RM	Rolo Metálico																													
RA	Rolo Metálico com articulação superior																													
PD	Pêndulo Metálico																													
PC	Pêndulo em Concreto Armado																													
FR	Articulação Freyssinet																													
CH	Placa de Chumbo																													
LP	Ligação Pórtico																													
TE	Tipo especial																													
NI	Não Informado																													
Aparelhos de Apoio (VIDE TABELA 1.A)																														
Local	Ponte/Encontro																													
Tipo	RM																													
Comentários:																														
4 INTERVENÇÕES																														
MANUTENÇÃO																														
Manutenção Anterior:	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Data (última manutenção):    /    /																												
Comentários:																														
REFORMA																														
Reforma Anterior:	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Substituição de Meios de Ligação: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO																												
Modificação estrutural:	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Substituição de Elementos estrutural: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO																												
Comentários: Reforma realizada em 2006/2007 relatada por Manoel Cardoso com substituição de chapas e rebites corroídos.																														
5 OUTROS ASPECTOS																														
PARTICULARIDADES																														
Desnível Máx. entre Greide e Terreno: _____ m	As Fundações encontram-se em Solo Mole? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO																													
Lâmina D'água: Normal: <u>0,50</u> m na Cheia <u>2,00</u> m	A vibração da Estrutura é Excessiva? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO																													
O Meio Ambiente é Agressivo? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	O Regime do Rio é Torrencial? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO																													
A Seção de Vazão é Adequada? <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	O Leito do Rio é Erodível? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO																													
Existe Drenagem no interior do caixão? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Estado de Conservação: <input type="checkbox"/> Boa <input checked="" type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Ruim																													
INSPEÇÃO ROTINEIRA (PARÂMETROS DE PLANEJAMENTO):																														
Melhor Época para Vistorias: <u>Acessível em qualquer época do ano</u>																														
Periodicidade: <input type="checkbox"/> Normal (2 anos) <input type="checkbox"/> Reduzida (1 ano) <input type="checkbox"/> Dilatada (4 anos) <input checked="" type="checkbox"/> Especial: <u>3 anos</u>	Equipamento Especial: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não																													
Acesso Direto: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Comentários:																													

#### 4.2.1.2 Detalhamento arquitetônico e estrutural da PEOP

Para melhor compreensão da geometria atual da PEOP foi realizado um estudo deste dado e a representação das medições em ambiente CAD. A Figura 4.1 mostra a planta desta ponte onde se observa a geometria trapezoidal na região dos apoios. Tal geometria se deu em função do posicionamento do leito do Rio transposto por essa estrutura. A vista no sentido longitudinal pode ser observada na Figura 4.2.

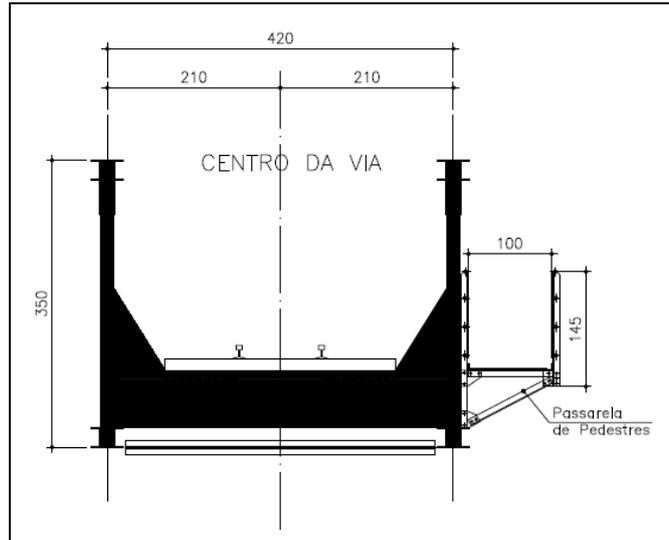


**Figura 4.1** – Planta da “Ponte da Estação de Ouro Preto”

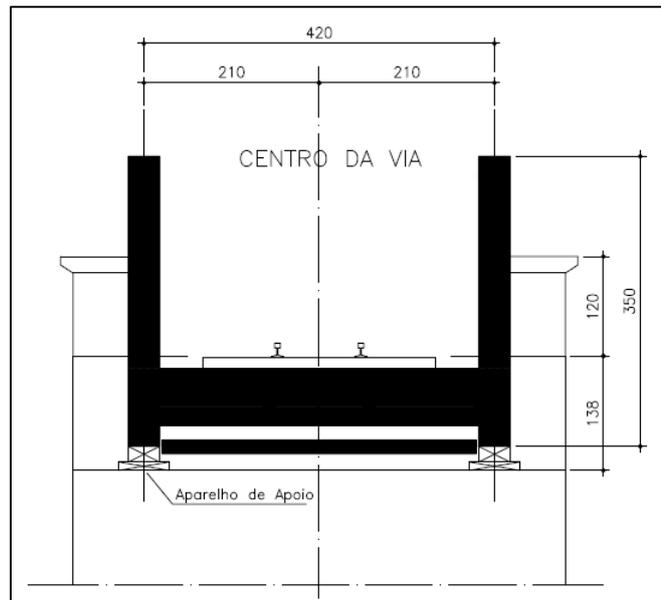


**Figura 4.2** – Vista lateral da “Ponte da Estação de Ouro Preto”

Os detalhes da seção transversal típica no meio do vão e na região dos apoios são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente.



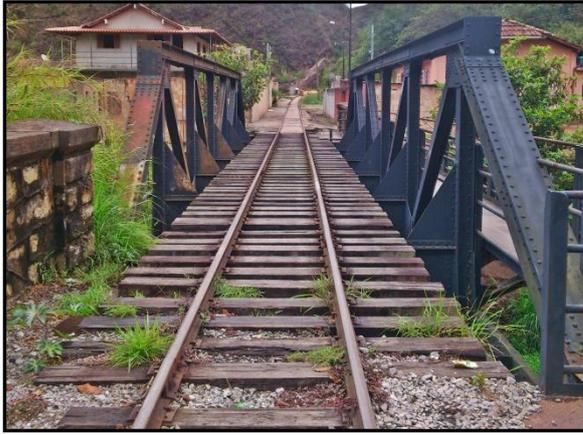
**Figura 4.3** – Seção transversal típica no meio do vão da “Ponte da Estação”



**Figura 4.4** – Seção transversal típica na região dos apoios da “Ponte da Estação”

#### 4.2.1.3 Registro fotográfico da PEOP

Segundo recomendação do DNIT (2004), o documentário fotográfico deve ser abrangente e completo: um mínimo de seis fotografias deve registrar vista superior, vista inferior, vista lateral e detalhes de apoios, articulações, juntas, etc.; defeitos eventualmente encontrados em qualquer elemento estrutural devem ser cuidadosamente examinados e registrados para permitir avaliar suas causas. A Figura 4.5 (a-h) ilustra a situação da ponte no ano de 2014, período no qual foi realizado as inspeções apresentadas nesse capítulo.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



**Figura 4.5** – Registro fotográfico da “Ponte da Estação de Ouro Preto/MG” (2014); (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) detalhe do pilar; (d) contraventamento na parte inferior da estrutura; (e) patologias no aparelho de apoio fixo; (f) patologias no aparelho de apoio móvel; (g) detalhe da ligação em chapa; (h) detalhe da ligação entre diagonais e montantes.

#### 4.2.1.4 *Ficha de Inspeção Especial da PEOP*

O estudo de caso deste trabalho foi analisado de forma mais abrangente possível devido ao seu estado de conservação. Os resultados da Inspeção Especial para esta ponte estão apresentados na Tabela 4.2 preenchida conforme modelo disposto no Anexo B.

Tabela 4.2 – Ficha de Inspeção Especial da PEOP

1. IDENTIFICAÇÃO / LOCALIZAÇÃO		Data:
OAE: Código: <u>CAE-ETCOM km 000</u> Nome / Referência: <u>Ponte da Estação de Ouro Preto</u>		<u>29/07/2014</u>
Malha: <u>Centro-Leste</u>	Ferrovias: <u>Central do Brasil</u>	Ramal: <u>Ponte Nova</u> UF: <u>MG</u>
Trecho: <u>Ouro Preto-Mariana</u> Localização (km): <u>0,00</u> Cidade Prox.: <u>Ouro Preto</u>		
Inspeção: <input type="checkbox"/> RFFSA <input checked="" type="checkbox"/> Outra Entidade:		
Nível em relação ao mar: <u>1600m</u>	Inspetor: <u>Wagner Cavallare de Souza</u>	
2. COMENTÁRIOS GERAIS		
Cond. de Estabilidade: <input checked="" type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Sofrível <input type="checkbox"/> Precária	Cond. de Conservação: <input type="checkbox"/> Boa <input checked="" type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Sofrível <input type="checkbox"/> Ruim	
Nível de Vibração do Tabuleiro: <input checked="" type="checkbox"/> Normal <input type="checkbox"/> Intenso <input type="checkbox"/> Exagerado		
Inspeção Especializada (Realizada por Engenheiro de Estruturas). Necessária? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Urgente? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
Já houve alguma inspeção anteriormente? <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO		
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: <u>Foi realizada inspeção cadastral anteriormente</u>		
3. ESTRADO / SUPERESTRUTURA		NOTA TÉCNICA <u>3</u>
Presença de Corrosão: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Red. Seção transversal: <input checked="" type="checkbox"/> Pouco <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Muito <input type="checkbox"/> Presença de furo	
Local e Tipos: (Vide Tabela B1) → <u>UNI - em todos os elementos estruturais; FRE - em alguns elementos estruturais no encontro da ponte com a passarela de pedestres</u>		
Defeito de Ligação: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Deslizamento de elemento de ligação: <input type="checkbox"/> Pouco <input type="checkbox"/> Muito <input type="checkbox"/> Colapso	
Local e Tipos: (Tabela B3 ou B4) → <u>RRO - montante número três; COR - vigas inferiores próximo aos apoios</u>		
Estado de Conservação da pintura: (Tabela B2) → <u>C2 - na estrutura em geral</u>		
Fissura Fina: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Trinca Exposta: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Estricção Excessiva: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Elemento Estrutural Pompado: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Flambagem Local de Elemento Estrutural: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Flambagem Global de Elemento Estrutural: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Deslocamento Exagerado de Viga principal: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Falha na impermeabilização: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Defeito em Junta de Dilatação: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Acúmulo de solo e Detritos: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	<u>No banzo inferior com os apoios</u>
Acúmulo de Água: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: <u>Degradação excessiva no apoio devido vazamento de água da tubulação de abastecimento local</u>		
4. MESOESTRUTURA		NOTA TÉCNICA <u>5</u>
Há Armadura Exposta? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Há Concreto Deteriorado? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Há Fissuras e Trinças? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Há Desaprumo ou Deslocamento de Pilar? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Há Fratura em Pilares? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
Há Aparelho de Ineficiente? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.:	
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS:		

5. INFRAESTRUTURA		NOTA TÉCNICA
Há Recalque de Fundação?	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
Há Deslocamento de Fundação?	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
Há Erosão no Terreno de Fundação?	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
Há Estacas Desenterradas?	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: <i>Crescimento de vegetação excessivo dificultando o acesso às partes inferiores da ponte.</i>		
6. FERROVIA		NOTA TÉCNICA
Há Irregularidades nos Trilhos?	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Especifique: _____
Junta de Dilatação dos Trilhos:	<input checked="" type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Faltando/Inoperante	
Ancoragem dos Trilhos:	<input checked="" type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Faltando Poucos Elementos de Ancoragem <input type="checkbox"/> Faltando Muitos Elementos de Ancoragem	
Ancoragem dos Dormentes:	<input checked="" type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Faltando Poucos Elementos de Ancoragem <input type="checkbox"/> Faltando Muitos Elementos de Ancoragem	
Há dormente Danificado?	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: _____		

#### 4.2.2 Inspeção na PBOP (Ponte da Barra de Ouro Preto/MG – km 1,17)

A metodologia empregada no levantamento das informações técnicas da “Ponte da Estação” foi adotada para compor os registros referentes a “Ponte da Barra” conforme itens a seguir. A exceção se encontra no fato de não ter sido realizado uma Inspeção Especial nesta estrutura já que o estudo de caso é a “Ponte da Estação”, como já mencionado.

##### 4.2.2.1 Ficha de Inspeção Cadastral da PBOP

A Tabela 4.3 apresenta a Ficha de Inspeção Cadastral para a “Ponte da Barra de Ouro Preto/MG” realizada segundo Anexo A e recomendações do DNIT (2004).

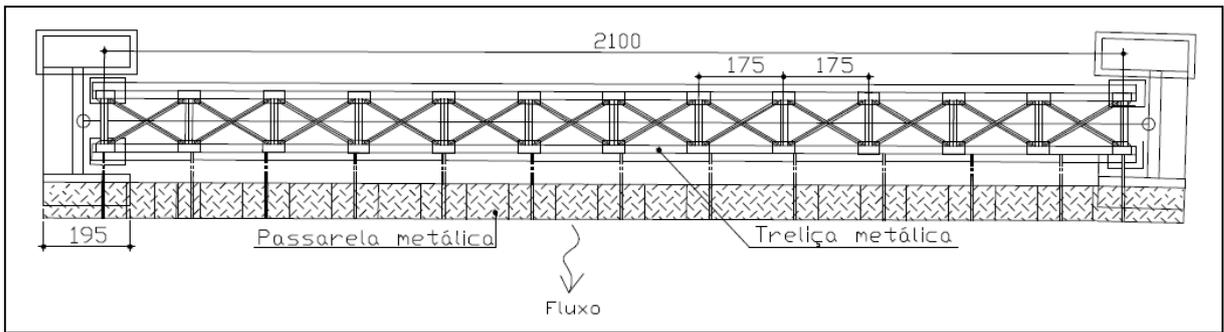
Tabela 4.3 – Ficha de Inspeção Cadastral da PBOP

1 DADOS BÁSICOS	
IDENTIFICAÇÃO / LOCALIZAÇÃO / JURISDIÇÃO	
Data: <u>21/07/2014</u>	
OAE: Código: <u>OAE-FICOM-km11</u> Nome / Referência: <u>Ponte da Barra</u>	
Tipo de Estrutura: Código <u>TS-17</u> (VIDE TABELA 2.A)	Natureza da Transposição: Código <u>NT-1</u> (VIDE TABELA 4.A)
Sistema Construtivo: Código <u>SC-08</u> (VIDE TABELA 3.A)	
Malha: <u>Centro-Leste</u>	Ferrovia: <u>Central do Brasil</u>
Ramal: <u>Ponte Nova</u> UF: <u>MG</u>	
Trecho: <u>Ouro Preto - Mariana</u>	Localização (km): <u>1,17</u> Cidade Prox.: <u>Ouro Preto</u>
Nível em relação ao mar: <u>1.600m</u>	Inspetor: <u>Wagner Cavalcante de Souza</u>
ADMINISTRAÇÃO	
Administrador: <input type="checkbox"/> RFFSA <input checked="" type="checkbox"/> CONCESSÃO <input type="checkbox"/> OUTROS	
Nome: <u>FCA (Ferrovia Centro Atlântica S.A.)</u> (para o caso concessão / outros)	
PROJETO / CONSTRUÇÃO	
Projetista: <u>Caetano Lopes Júnior</u>	Ano da Construção: <u>1914</u>
Construtor: <u>Caetano Lopes Júnior</u>	Arquivo: <u>Pro.opm.pt.1.02</u> Trem-Tipo Classe: <u>TR140 (atual)</u>
GEOMETRIA	
Comprimento (m): <u>37,41</u>	Largura (m): <u>1,40</u> Altura (m): <u>2,00</u> Nº de vãos: <u>3</u> Comp. Dos Vãos (m) <u>8,23 - 21,00 - 8,18</u>
Altura da Viga no Apoio (m): <u>2,00</u>	Altura da Viga no Vão (m): <u>2,00</u> Altura Máxima de Pilar (m): <u>16,50</u> Comprimento do Vão Maior (m): <u>21,00</u>
Comentários:	
2 DADOS SOBRE CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS	
CARACTERÍSTICAS PLANI-ALTIMÉTRICAS	
Região: <input type="checkbox"/> PLANA <input checked="" type="checkbox"/> ONDULADA <input type="checkbox"/> MONTANHOSA	Greide: Rampa Máxima (%): <u>zero</u>
Traçado: <input type="checkbox"/> TANGENTE <input checked="" type="checkbox"/> CURVO	Raio (m): <u>-</u> Travessia: <input checked="" type="checkbox"/> ORTOGONAL <input type="checkbox"/> ESCONSA
CARACTERÍSTICAS DA VIA	
Bitola da via (m): <u>1,00</u>	Trilho: <input type="checkbox"/> Simples <input checked="" type="checkbox"/> Duplo
Nº de vias: <u>1 (uma)</u>	Passarela: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO
Estrado: <input checked="" type="checkbox"/> Sup. <input type="checkbox"/> Inf.	Dormente: <input checked="" type="checkbox"/> Madeira <input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Concreto
Drenos: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
Tubulação de Utilidade Pública: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
GABARITOS	
Para Viaduto: Horizontal (m): Vertical (m):	
Para Ponte s/ Rio Navegável: Horizontal (m): <u>19,75</u> Vertical (m): <u>14,50</u>	
Proteção dos Pilares Contra Choque de Embarcação? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
ACESSO	
Viaduto de Acesso: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Nº de vãos: <u>2 extremidades</u> Comp. Dos Vãos (m) <u>8,23 - 8,18</u>
Tipo de Estrutura: Código <u>ST-1</u>	Natureza da Transposição: Código <u>NT-5</u> Sistema Construtivo: Código <u>SC-1</u>
PEDESTRE	
Passarela de Pedestre: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Nº de vãos: <u>22</u> Comp. Dos Vãos (m) <u>1,75 cada</u>
Tipo de Estrutura: Código <u>TS-3</u>	Natureza da Transposição: Código <u>NT-6</u> Sistema Construtivo: Código <u>SC-12</u>
TRÁFEGO	
Característica do Tráfego: <input checked="" type="checkbox"/> Ferroviário <input type="checkbox"/> Roroferroviário	Nº de Composições/Dia (Média): <u>3 vezes</u>
Comentários:	

3 CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL																																																														
MATERIAIS / SEÇÃO TIPO																																																														
COMPONENTE	MATERIAL (CÓDIGO) (VER TABELA 5.A)	SEÇÃO TIPO (CÓDIGO) (VER TABELA 6.A)																																																												
ESTRADO	AC	VT																																																												
VIGAS PRINCIPAIS	AC	VT																																																												
PILARES	PD	2CJ																																																												
FUNDAÇÕES	IG	IG																																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">TABELA 1.A - TIPOS DE APARELHOS DE APOIO</th> </tr> <tr> <th>Cód.</th> <th colspan="3">Descrição</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CR</td> <td colspan="3">Cremalheira</td> </tr> <tr> <td>NP</td> <td colspan="3">Elastomérico (Neoprene)</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td colspan="3">Fixo metálico com Rotula de Aço</td> </tr> <tr> <td>FM</td> <td colspan="3">Fixo Metálico (Chapa de Aço)</td> </tr> <tr> <td>RM</td> <td colspan="3">Rolo Metálico</td> </tr> <tr> <td>RA</td> <td colspan="3">Rolo Metálico com articulação superior</td> </tr> <tr> <td>PD</td> <td colspan="3">Pêndulo Metálico</td> </tr> <tr> <td>PC</td> <td colspan="3">Pêndulo em Concreto Armado</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td colspan="3">Articulação Freyssinet</td> </tr> <tr> <td>CH</td> <td colspan="3">Placa de Chumbo</td> </tr> <tr> <td>LP</td> <td colspan="3">Ligação Pórtico</td> </tr> <tr> <td>TE</td> <td colspan="3">Tipo especial</td> </tr> <tr> <td>NI</td> <td colspan="3">Não Informado</td> </tr> </tbody> </table>			TABELA 1.A - TIPOS DE APARELHOS DE APOIO				Cód.	Descrição			CR	Cremalheira			NP	Elastomérico (Neoprene)			FR	Fixo metálico com Rotula de Aço			FM	Fixo Metálico (Chapa de Aço)			RM	Rolo Metálico			RA	Rolo Metálico com articulação superior			PD	Pêndulo Metálico			PC	Pêndulo em Concreto Armado			FR	Articulação Freyssinet			CH	Placa de Chumbo			LP	Ligação Pórtico			TE	Tipo especial			NI	Não Informado		
TABELA 1.A - TIPOS DE APARELHOS DE APOIO																																																														
Cód.	Descrição																																																													
CR	Cremalheira																																																													
NP	Elastomérico (Neoprene)																																																													
FR	Fixo metálico com Rotula de Aço																																																													
FM	Fixo Metálico (Chapa de Aço)																																																													
RM	Rolo Metálico																																																													
RA	Rolo Metálico com articulação superior																																																													
PD	Pêndulo Metálico																																																													
PC	Pêndulo em Concreto Armado																																																													
FR	Articulação Freyssinet																																																													
CH	Placa de Chumbo																																																													
LP	Ligação Pórtico																																																													
TE	Tipo especial																																																													
NI	Não Informado																																																													
Aparelhos de Apoio (VIDE TABELA 1.A)																																																														
Local	Ponte/Pilar Viaduto/encontro/pilar																																																													
Tipo	AM	NJ	NJ																																																											
Comentários:																																																														
4 INTERVENÇÕES																																																														
MANUTENÇÃO																																																														
Manutenção Anterior:	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Data (ultima manutenção): ___ / ___ / ___																																																												
Comentários:																																																														
REFORMA																																																														
Reforma Anterior:	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Substituição de Meios de Ligação: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO																																																												
Modificação estrutural:	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Substituição de Elementos estrutural: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO																																																												
Comentários: Reforma realizada em 2006/2007 relatada por Manoel Cardoso com mudança da concepção estrutural, substituição de elementos rompidos e de rebites defeituosos.																																																														
5 OUTROS ASPECTOS																																																														
PARTICULARIDADES																																																														
Desnível Máx. entre Greide e Terreno: _____ m	As Fundações encontram-se em Solo Mole?	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO																																																												
Lâmina D'água: Normal: <u>0,80</u> m na Cheia <u>2,50</u> m	A vibração da Estrutura é Excessiva?	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO																																																												
O Meio Ambiente é Agressivo? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	O Regime do Rio é Torrencial?	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO																																																												
A Seção de Vazão é Adequada? <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	O Leito do Rio é Erodível?	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO																																																												
Existe Drenagem no interior do caixão? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Estado de Conservação:	<input checked="" type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Ruim																																																												
INSPEÇÃO ROTINEIRA (PARÂMETROS DE PLANEJAMENTO):																																																														
Melhor Época para Vistorias: <u>Acessível em qualquer época do ano</u>																																																														
Periodicidade: <input type="checkbox"/> Normal (2 anos) <input type="checkbox"/> Reduzida (1 ano) <input type="checkbox"/> Dilatada (4 anos) <input checked="" type="checkbox"/> Especial: <u>3 anos</u>																																																														
Acesso Direto: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Equipamento Especial: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não																																																													
Comentários:																																																														

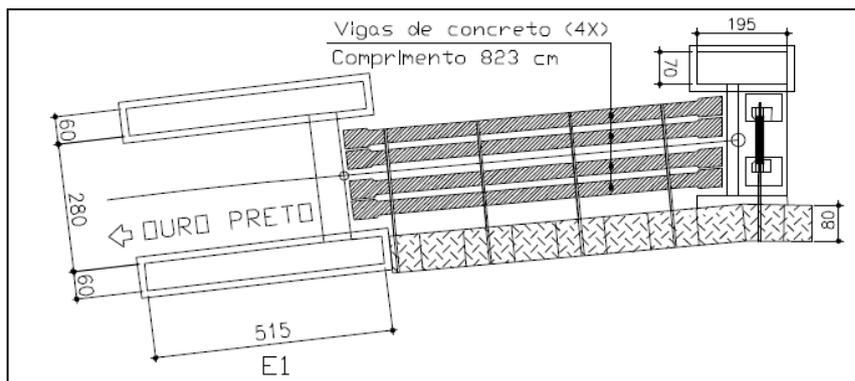
#### 4.2.2.2 Detalhamento arquitetônico e estrutural da PBOP

O detalhamento arquitetônico da Ponte da Barra foi embasado no trabalho de CARDOSO (2007). A Figura 5.6 apresenta a planta da ponte metálica seguida da Figura 4.7 e 4.8 que ilustram os antigos viadutos de acesso a ponte pelo lado de Ouro Preto e pelo lado de Mariana, respectivamente.



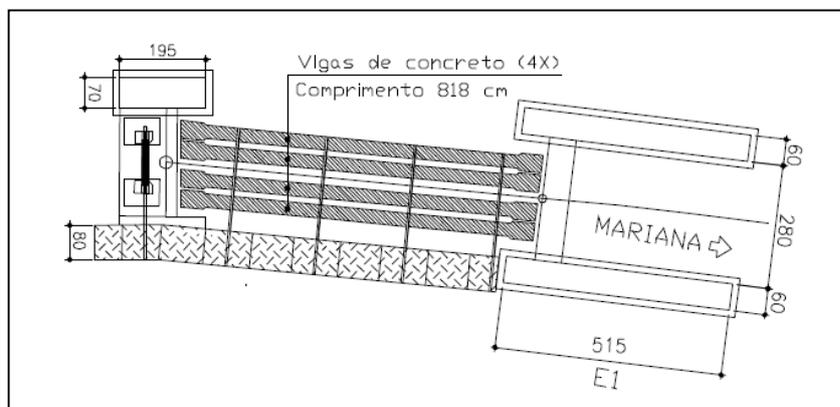
**Figura 4.6** – Planta da “Ponte da Barra” (parte metálica)

Fonte: CARDOSO, 2007



**Figura 4.7** – Planta do viaduto de acesso à PBOP (em concreto armado – sentido Ouro Preto/MG)

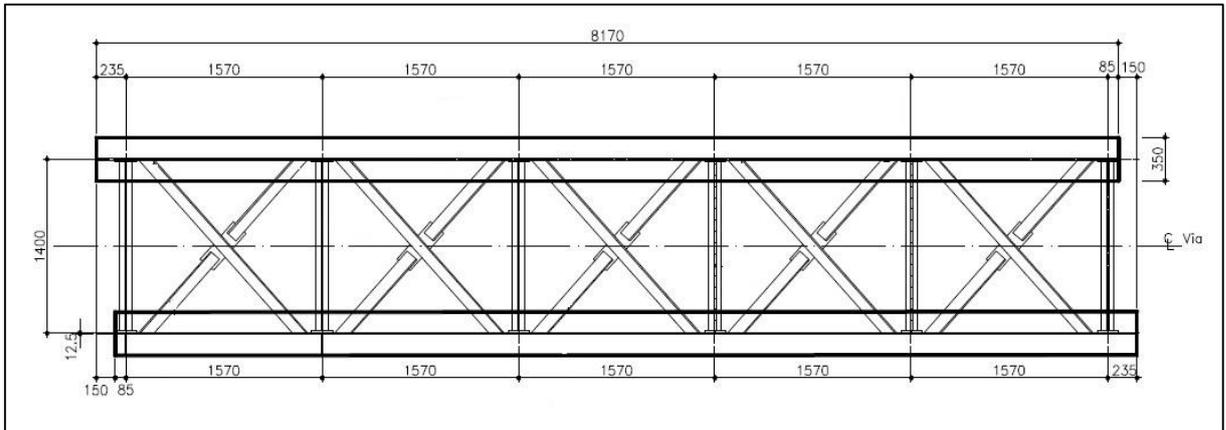
Fonte: CARDOSO, 2007



**Figura 4.8** – Planta do viaduto de acesso à PBOP (em concreto armado – sentido Mariana/MG)

Fonte: CARDOSO, 2007

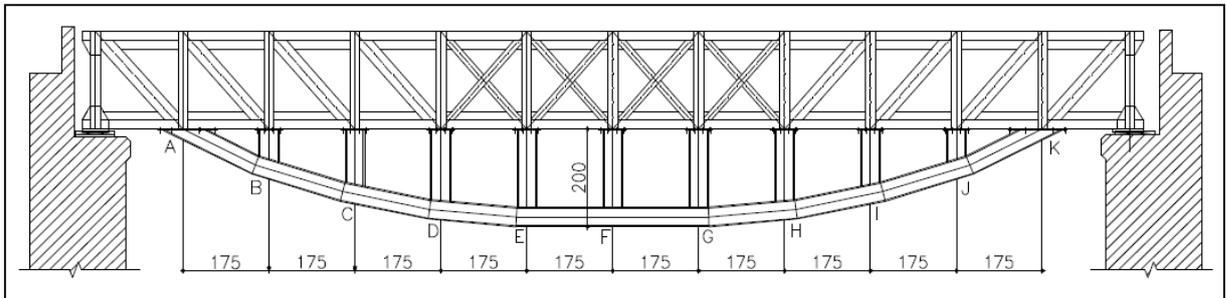
Em virtude do alto grau de deterioração do viaduto de concreto armado este foi substituído por novos viadutos feitos em aço estrutural ASTM A36, travados lateralmente por cantoneiras do mesmo aço (CARDOSO, 2007). A planta do novo viaduto está representada na Figura 4.9.



**Figura 4.9** – Planta do atual viaduto de acesso à PBOP (em estrutura metálica)

**Fonte:** CARDOSO, 2007

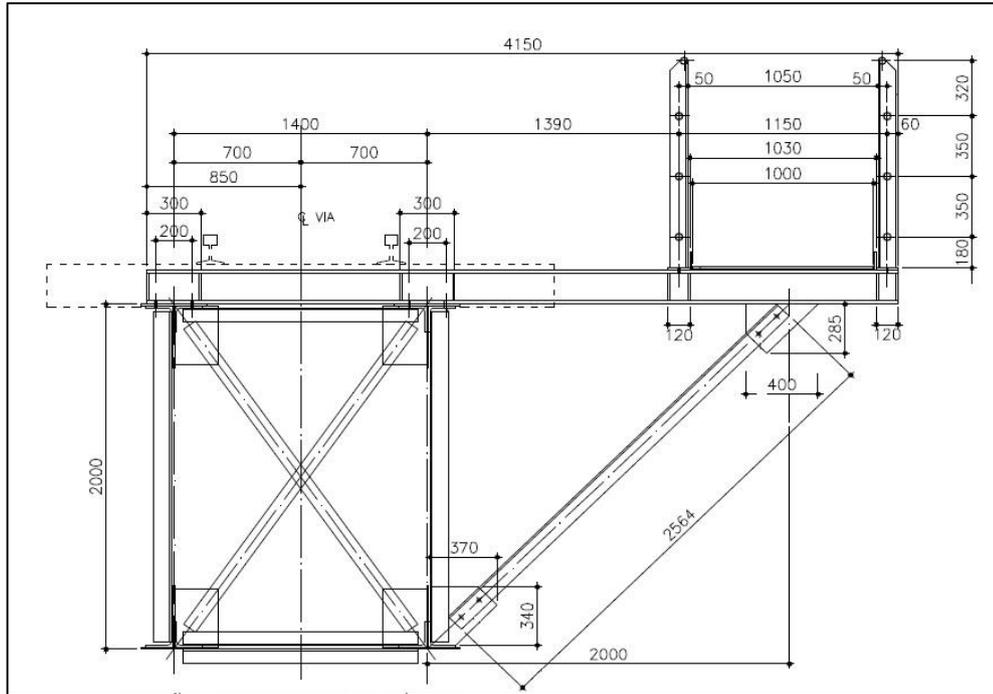
O reforço estrutural feito na estrutura da ponte para aumentar a rigidez do conjunto e diminuir as vibrações excessivas constatadas na época, está representado esquematicamente na vista lateral da Figura 4.10.



**Figura 4.10** – Vista lateral da “Ponte da Barra” (parte metálica)

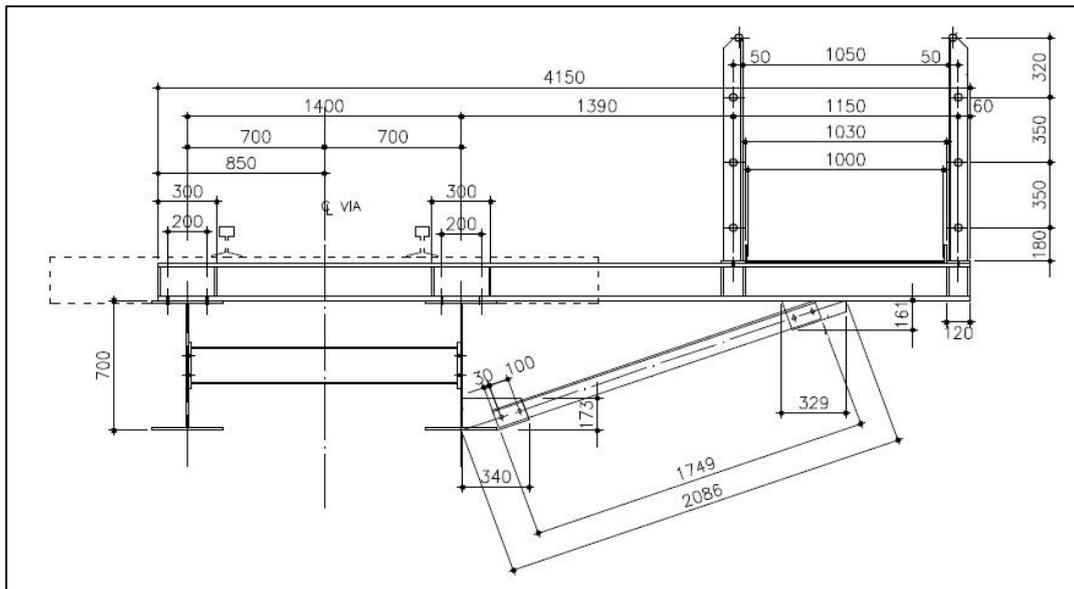
**Fonte:** CARDOSO, 2007

A seção transversal típica no meio do vão e a na região dos encontros com os viadutos de acesso estão ilustrados nas Figuras 4.11 e 4.12 respectivamente.



**Figura 4.11** – Seção transversal típica no meio do vão da PBOP

Fonte: CARDOSO, 2007



**Figura 4.12** – Seção transversal típica nos viadutos de acesso da PBOP

Fonte: CARDOSO, 2007

#### 4.2.2.3 Registro fotográfico da PBOP

A Figura 4.13 (a-h) impõe o documentário fotográfico atualizado da “Ponte da Barra de Ouro Preto segundo recomendações do DNIT (2004).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



**Figura 4.13** – Registro fotográfico da “Ponte da Barra de Ouro Preto/MG” (2014); (a) vista superior; (b) vista lateral; (c) e (d) detalhe dos aparelhos de apoio; (e) e (f) suporte da passarela de pedestres; (g) e (h) patologias na passarela de pedestres

### 4.2.3 Inspeção no Pontilhão do km 5,65 (Ferrovia Ouro Preto – Mariana/MG)

O “Pontilhão do km 5,65” que não possuía ficha de inspeção cadastral nem registro fotográfico realizado no trabalho de CARDOSO (2007), foi vistoriado e incluído, da forma mais completa possível, seguindo os parâmetros da “Ponte da Barra”.

#### 4.2.3.1 *Ficha de Inspeção Cadastral do “Pontilhão do km 5,65”*

Este pontilhão não possuía registros de Inspeção Cadastral por isso foi realizado para melhor estudo e conhecimento do trecho. A Tabela 4.4 apresenta o resultado da inspeção com as principais características da obra.

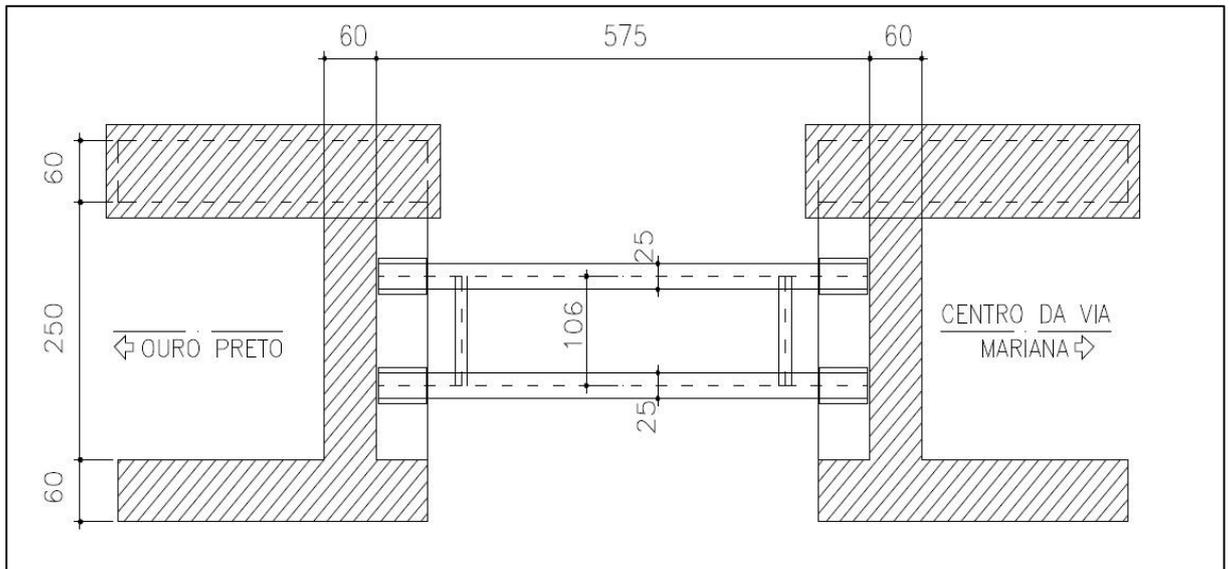
Tabela 4.4 – Ficha de Inspeção Cadastral do “Pontilhão do km 5,65”

1 DADOS BÁSICOS	
IDENTIFICAÇÃO / LOCALIZAÇÃO / JURISDIÇÃO	
Data: <u>21/07/2014</u>	
OAE: Código: <u>OAE-FTCOM km 5,65</u> Nome / Referência: <u>Pontilhão do km 5,65</u>	
Tipo de Estrutura: Código <u>-</u> (VIDE TABELA 2.A)	Natureza da Transposição: Código <u>-</u> (VIDE TABELA 4.A)
Sistema Construtivo: Código <u>-</u> (VIDE TABELA 3.A)	
Malha: <u>Centro-Leste</u>	Ferrovia: <u>Central do Brasil</u>
Ramal: <u>Ponte Nova</u>	UF: <u>MG</u>
Trecho: <u>Ouro Preto - Mariana</u>	Localização (km): <u>5,65</u>
Cidade Prox.: <u>Ouro Preto</u>	
Nível em relação ao mar: <u>-</u>	Inspetor: <u>Wagner Cavalcante de Souza</u>
ADMINISTRAÇÃO	
Administrador: <input type="checkbox"/> RFFSA <input checked="" type="checkbox"/> CONCESSÃO <input type="checkbox"/> OUTROS	
Nome: <u>FCA (Ferrovia Centro Atlântica S.A.)</u> (para o caso concessão / outros)	
PROJETO / CONSTRUÇÃO	
Projetista: <u>Caetano Lopes Júnior</u>	Ano da Construção: <u>1914</u>
Construtor: <u>Caetano Lopes Júnior</u>	Arquivo: <u>Pro.opm.pt0502</u>
Item-Tipo Classe: <u>TR 140 (atual)</u>	
GEOMETRIA	
Comprimento ( m ): <u>5,75</u>	Largura ( m ): <u>1,30</u>
Altura ( m ): <u>0,70</u>	Nº de vãos: <u>1</u>
Comp. Dos Vãos ( m ): <u>5,75</u>	
Altura da Viga no Apoio ( m ): <u>0,70</u>	Altura da Viga no Vão ( m ): <u>0,70</u>
Altura Máxima de Pilar ( m ): <u>5,30</u>	Comprimento do Vão Maior ( m ): <u>5,75</u>
Comentários:	
2 DADOS SOBRE CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS	
CARACTERÍSTICAS PLANI-ALTIMÉTRICAS	
Região: <input checked="" type="checkbox"/> PLANA <input type="checkbox"/> ONDULADA <input type="checkbox"/> MONTANHOSA	Greide: Rampa Máxima (%): <u>zero</u>
Traçado: <input checked="" type="checkbox"/> TANGENTE <input type="checkbox"/> CURVO	Raio ( m ): _____
Travessia: <input checked="" type="checkbox"/> ORTOGONAL <input type="checkbox"/> ESCONSA	
CARACTERÍSTICAS DA VIA	
Bitola da via ( m ): <u>1,00</u>	Trilho: <input checked="" type="checkbox"/> Simples <input type="checkbox"/> Duplo
Nº de vias: <u>1 (uma)</u>	Passarela: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO
Estrado: <input checked="" type="checkbox"/> Sup. <input type="checkbox"/> Inf.	Dormente: <input checked="" type="checkbox"/> Madeira <input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Concreto
Drenos: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
Tubulação de Utilidade Pública: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
GABARITOS	
Para Viaduto: Horizontal ( m ): _____ Vertical ( m ): _____	
Para Ponte s/ Rio Navegável: Horizontal ( m ): _____ Vertical ( m ): _____	
Proteção dos Pilares Contra Choque de Embarcação? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
ACESSO	
Viaduto de Acesso: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Nº de vãos: _____
Comp. Dos Vãos ( m ): _____	
Tipo de Estrutura: Código _____	Natureza da Transposição: Código _____
Sistema Construtivo: Código _____	
PEDESTRE	
Passarela de Pedestre: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Nº de vãos: _____
Comp. Dos Vãos ( m ): _____	
Tipo de Estrutura: Código _____	Natureza da Transposição: Código _____
Sistema Construtivo: Código _____	
TRÁFEGO	
Característica do Tráfego: <input checked="" type="checkbox"/> Ferroviário <input type="checkbox"/> Roroferroviário	Nº de Composições/Dia (Média): <u>3 vezes</u>
Comentários:	

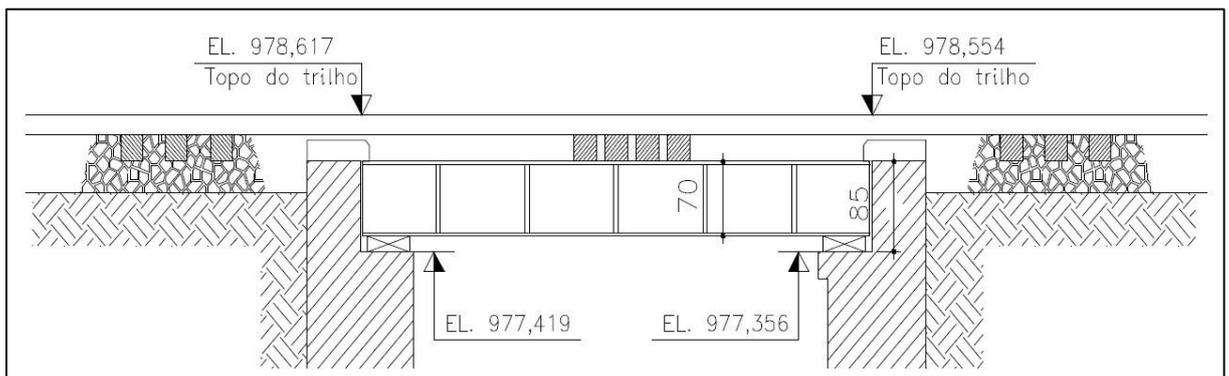
3 CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL		
MATERIAIS / SEÇÃO TIPO		
COMPONENTE	MATERIAL (CÓDIGO) (VER TABELA 5.A)	SEÇÃO TIPO (CÓDIGO) (VER TABELA 6.A)
ESTRADO	AC	VT
VIGAS PRINCIPAIS	AC	VT
PILARES	PD	2CI
FUNDAÇÕES	IG	IG
<b>Aparelhos de Apoio (VIDE TABELA 1.A)</b> Local → <u>Ponte / Pilar</u> Tipo → <u>NI</u>		
Comentários:		
TABELA 1.A - TIPOS DE APARELHOS DE APOIO		
Cód.	Descrição	
CR	Cremalheira	
NP	Elastométrico (Neoprene)	
FR	Fixo metálico com Rotula de Aço	
FM	Fixo Metálico (Chapa de Aço)	
RM	Rolo Metálico	
RA	Rolo Metálico com articulação superior	
PD	Pêndulo Metálico	
PC	Pêndulo em Concreto Armado	
FR	Articulação Freyssinet	
CH	Placa de Chumbo	
LP	Ligação Pórtico	
TE	Tipo especial	
NI	Não Informado	
4 INTERVENÇÕES		
MANUTENÇÃO		
Manutenção Anterior:	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Data (ultima manutenção): ___ / ___ / ___
Comentários:		
REFORMA		
Reforma Anterior:	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Substituição de Meios de Ligação: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO
Modificação estrutural:	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Substituição de Elementos estrutural: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO
Comentários: <u>Reforma realizada em 2006/2007 relatada por Manoel Cardoso.</u>		
5 OUTROS ASPECTOS		
PARTICULARIDADES		
Desnível Máx. entre Greide e Terreno: _____ m	As Fundações encontram-se em Solo Mole? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
Lâmina D'água: Normal: <u>0,30</u> m na Cheia <u>1,20</u> m	A vibração da Estrutura é Excessiva? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
O Meio Ambiente é Agressivo? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	O Regime do Rio é Torrencial? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
A Seção de Vazão é Adequada? <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	O Leito do Rio é Erodível? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
Existe Drenagem no interior do caixão? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Estado de Conservação: <input checked="" type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Ruim	
INSPEÇÃO ROTINEIRA (PARÂMETROS DE PLANEJAMENTO)		
Melhor Época para Vistorias: <u>Acessível em qualquer época do ano</u>		
Periodicidade: <input type="checkbox"/> Normal (2 anos) <input type="checkbox"/> Reduzida (1 ano) <input type="checkbox"/> Dilatada (4 anos) <input checked="" type="checkbox"/> Especial: <u>3 anos</u>	Equipamento Especial: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	
Acesso Direto: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Comentários:	

#### 4.2.3.2 Detalhamento arquitetônico e estrutural do “Pontilhão do km 5,65” da Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”

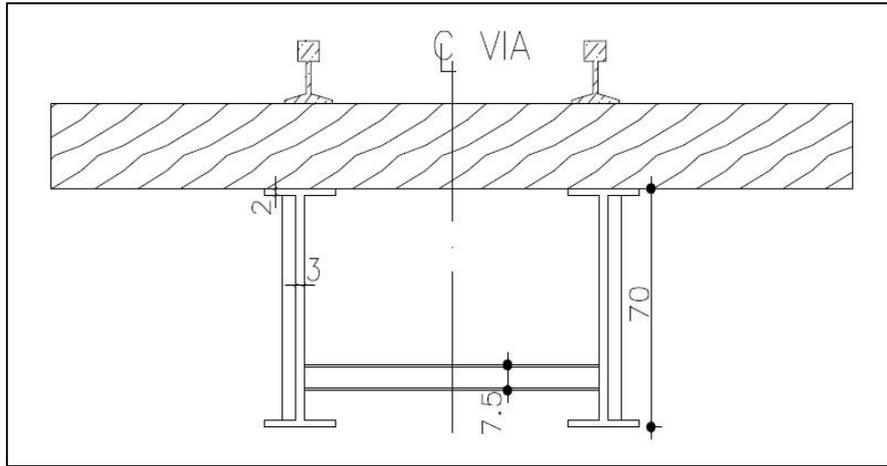
O detalhamento arquitetônico e estrutural do “Pontilhão do km 5,65” foi realizado para abranger todos os aspectos principais da estrutura conforme se observa nas Figuras 4.14 a 4.17.



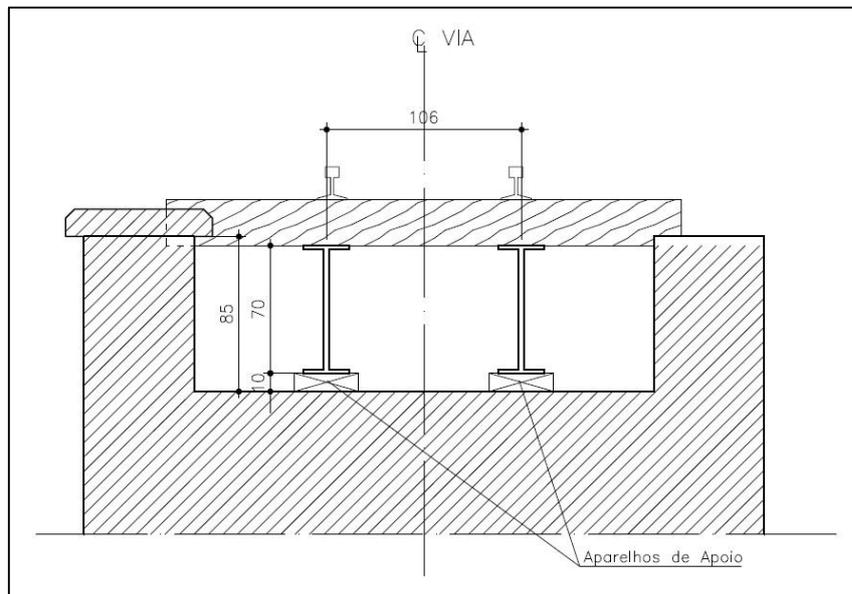
**Figura 4.14** – Planta do “Pontilhão do km 5,65” da Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”



**Figura 4.15** – Vista longitudinal do “Pontilhão do km 5,65” “Ouro Preto – Mariana”



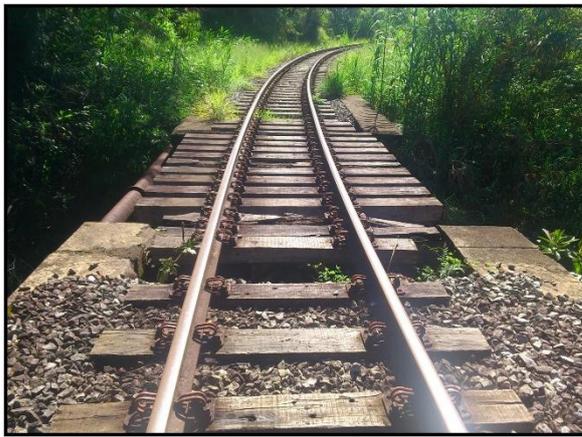
**Figura 4.16** – Seção transversal típica no meio do vão do “Pontilhão do km 5,65”  
“Ouro Preto – Mariana”



**Figura 4.17** – Seção transversal típica na região dos apoios do “Pontilhão do km 5,65”  
“Ouro Preto – Mariana”

#### 4.2.3.3 Registro fotográfico do “Pontilhão do km 5,65”

O registro fotográfico da Figura 4.18 ilustra os principais detalhes da estrutura do “Pontilhão do km 5,65”.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 4.18** – Registro fotográfico do “Pontilhão do km 5,65” (2014); (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) detalhe do pilar; (d) aparelho de apoio; (e) detalhe do contraventamento interno; (f) curso d’água e acúmulo de matéria orgânica na estrutura

#### 4.2.4 Inspeção no Pontilhão do km 11,30 (Ferrovia Ouro Preto – Mariana/MG)

O “Pontilhão do km 11,30” tem muitas semelhanças com o pontilhão do item anterior e também não consta, de forma abrangente, nos registros de CARDOSO (2007). Os procedimentos para essa estrutura seguem nos itens a seguir.

##### 4.2.4.1 *Ficha de Inspeção Cadastral do “Pontilhão do km 11,30” da Ferrovia Ouro Preto - Mariana*

O cadastro do “Pontilhão do km 11,30” foi realizado segundo Anexo A e recomendações do DNIT (2004) conforme apresentado na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Ficha de Inspeção Cadastral do “Pontilhão do km 11,30” da Ferrovia  
“Ouro Preto – Mariana”**

1 DADOS BÁSICOS			
IDENTIFICAÇÃO / LOCALIZAÇÃO / JURISDIÇÃO			Data: 21/07/2014
OAE: Código: OAE-FICOM km 11,30 Nome / Referência: Pontilhão do km 11,30			
Tipo de Estrutura: Código (VIDE TABELA 2.A)	Natureza da Transposição: Código (VIDE TABELA 4.A)	Sistema Construtivo: Código (VIDE TABELA 3.A)	
Malha: Centro-Leste	Ferrovia: Central do Brasil	Ramal: Ponte Nova	UF: MG
Trecho: Ouro Preto - Mariana		Localização (km): 11,30	Cidade Prox.: Mariana
Nível em relação ao mar: -	Inspetor: Wagner Cavaleiro de Souza		
ADMINISTRAÇÃO			
Administrador: <input type="checkbox"/> RFFSA <input checked="" type="checkbox"/> CONCESSÃO <input type="checkbox"/> OUTROS			
Nome: FCA (Ferrovia Centro Atlântica S.A.) (para o caso concessão / outros)			
PROJETO / CONSTRUÇÃO			
Projetista: Caetano Lopes Junior		Ano da Construção: 1914	
Construtor: Caetano Lopes Junior		Arquivo: Pro.opm.pt.1101	Item-Tipo Classe: TR 140 (atual)
GEOMETRIA			
Comprimento (m): 5,86		Largura (m): 1,70	Altura (m): 0,80
Nº de vãos: 1		Comp. Dos Vãos (m): 5,86	
Altura da Viga no Apoio (m): 0,80		Altura da Viga no Vão (m): 0,80	Altura Máxima de Pilar (m):
Comprimento do Vão Maior (m): 5,86		Comentários:	
2 DADOS SOBRE CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS			
CARACTERÍSTICAS PLANI-ALTIMÉTRICAS			
Região: <input checked="" type="checkbox"/> PLANA <input type="checkbox"/> ONDULADA <input type="checkbox"/> MONTANHOSA	Greide: Rampa Máxima (%): zero		
Traçado: <input checked="" type="checkbox"/> TANGENTE <input type="checkbox"/> CURVO	Raio (m):	Travessia: <input checked="" type="checkbox"/> ORTOGONAL <input type="checkbox"/> ESCONSA	
CARACTERÍSTICAS DA VIA			
Bitola da via (m): 1,00	Trilho: <input checked="" type="checkbox"/> Simples <input type="checkbox"/> Duplo	Drenos: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
Nº de vias: 1 (uma)	Passarela: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Tubulação de Utilidade Pública:	
Estrado: <input checked="" type="checkbox"/> Sup. <input type="checkbox"/> Inf.	Dormente: <input checked="" type="checkbox"/> Madeira <input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Concreto	<input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
GABARITOS			
Para Viaduto:	Horizontal (m):	Vertical (m):	
Para Ponte s/ Rio Navegável:	Horizontal (m):	Vertical (m):	
Proteção dos Pilares Contra Choque de Embarcação? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO			
ACESSO			
Viaduto de Acesso: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Nº de vãos: Comp. Dos Vãos (m)		
Tipo de Estrutura: Código	Natureza da Transposição: Código	Sistema Construtivo: Código	
PEDESTRE			
Passarela de Pedestre: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	Nº de vãos: Comp. Dos Vãos (m)		
Tipo de Estrutura: Código	Natureza da Transposição: Código	Sistema Construtivo: Código	
TRÁFEGO			
Característica do Tráfego: <input checked="" type="checkbox"/> Ferroviário <input type="checkbox"/> Roroferroviário			
Nº de Composições/Dia (Média):		3 vezes	
Comentários:			

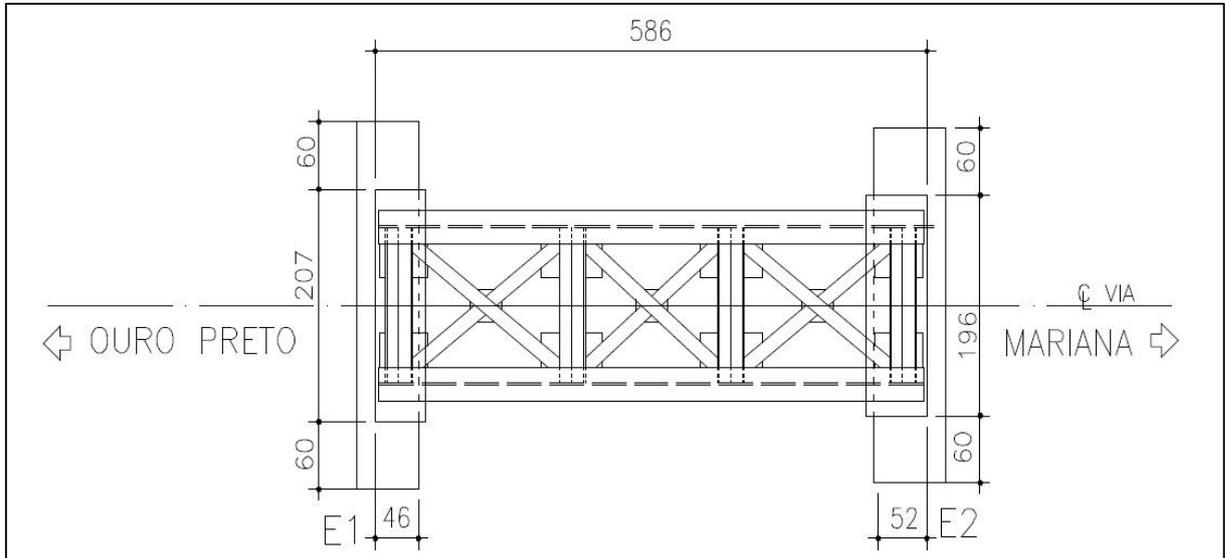
3 CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL		
MATERIAIS / SEÇÃO TIPO:		
COMPONENTE	MATERIAL (CÓDIGO) (VER TABELA 5.A)	SEÇÃO TIPO (CÓDIGO) (VER TABELA 6.A)
ESTRADO	AC	VT
VIGAS PRINCIPAIS	AC	VT
PILARES	PD	2CI
FUNDAÇÕES	IG	IG
<b>Aparelhos de Apoio (VIDE TABELA 1.A)</b> Local → <u>Ponte/Pilar</u> Tipo → <u>NI</u>		
Comentários:		
<b>4 INTERVENÇÕES</b> MANUTENÇÃO Manutenção Anterior: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO      Data (última manutenção): ___ / ___ / ___ Comentários:		
REFORMA Reforma Anterior: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO      Substituição de Meios de Ligação: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO Modificação estrutural: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO      Substituição de Elementos estrutural: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO Comentários: <u>Reforma realizada em 2006/2007 relatada por Manoel Cardoso.</u>		
<b>5 OUTROS ASPECTOS</b> PARTICULARIDADES Desnível Máx. entre Greide e Terreno: _____ m      As Fundações encontram-se em Solo Mole? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO Lâmina D'água: Normal: _____ m      na Cheia _____ m      A vibração da Estrutura é Excessiva? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO O Meio Ambiente é Agressivo? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO      O Regime do Rio é Torrencial? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO A Seção de Vazão é Adequada? <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO      O Leito do Rio é Erodível? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO Existe Drenagem no interior do caixão? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO      Estado de Conservação: <input checked="" type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Ruim		
INSPEÇÃO ROTINEIRA (PARÂMETROS DE PLANEJAMENTO): Melhor Época para Vistorias: <u>Acessível em qualquer época do ano</u> Periodicidade: <input type="checkbox"/> Normal (2 anos) <input type="checkbox"/> Reduzida (1 ano) <input type="checkbox"/> Dilatada (4 anos) <input checked="" type="checkbox"/> Especial: <u>3 anos</u> Acesso Direto: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não      Equipamento Especial: <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não Comentários:		

TABELA 1.A - TIPOS DE APARELHOS DE APOIO

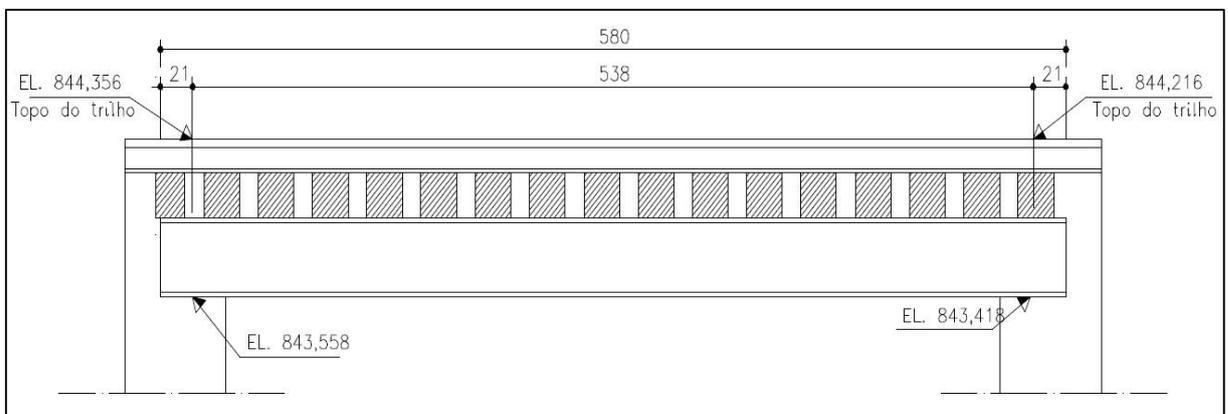
Cód.	Descrição
CR	Cremalheira
NP	Elastomérico (Neoprene)
FR	Fixo metálico com Rotula de Aço
FM	Fixo Metálico (Chapa de Aço)
RM	Rolo Metálico
RA	Rolo Metálico com articulação superior
PD	Pêndulo Metálico
PC	Pêndulo em Concreto Armado
FR	Articulação Freyssinet
CH	Placa de Chumbo
LP	Ligação Pórtico
TE	Tipo especial
NI	Não Informado

#### 4.2.4.2 Detalhamento arquitetônico e estrutural do “Pontilhão do km 11,30” da Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”

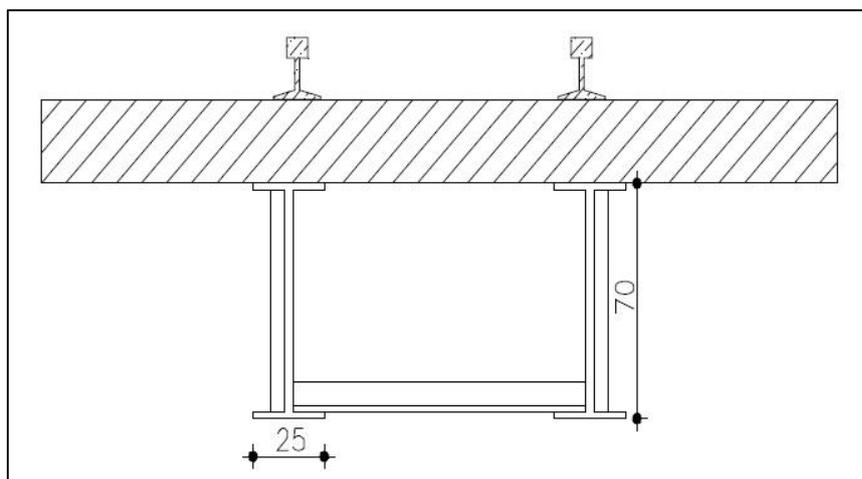
As dimensões do “Pontilhão do km 11,30” estão apresentadas nas Figuras 4.19 a 4.22



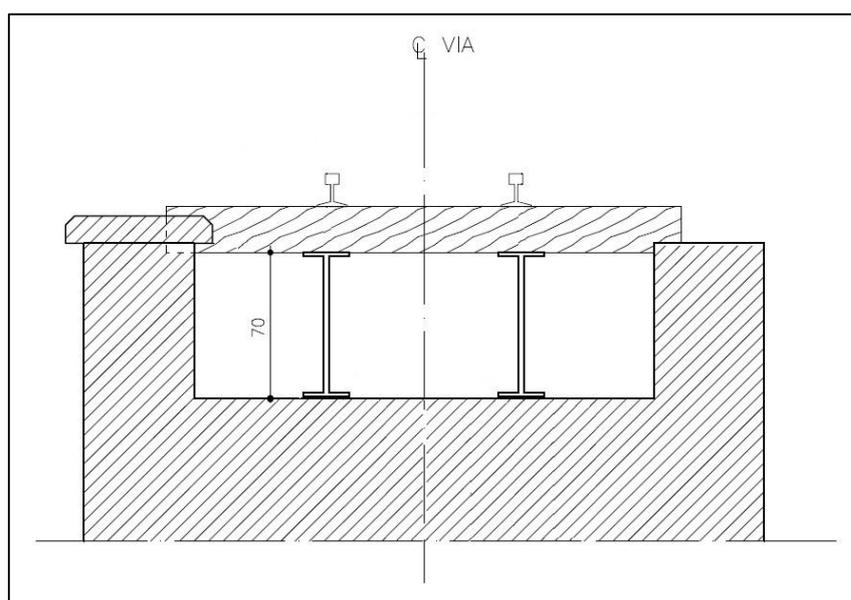
**Figura 4.19** – Planta do “Pontilhão do km 11,30” da “Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”



**Figura 4.20** – Vista longitudinal do “Pontilhão do km 11,30” da “Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”



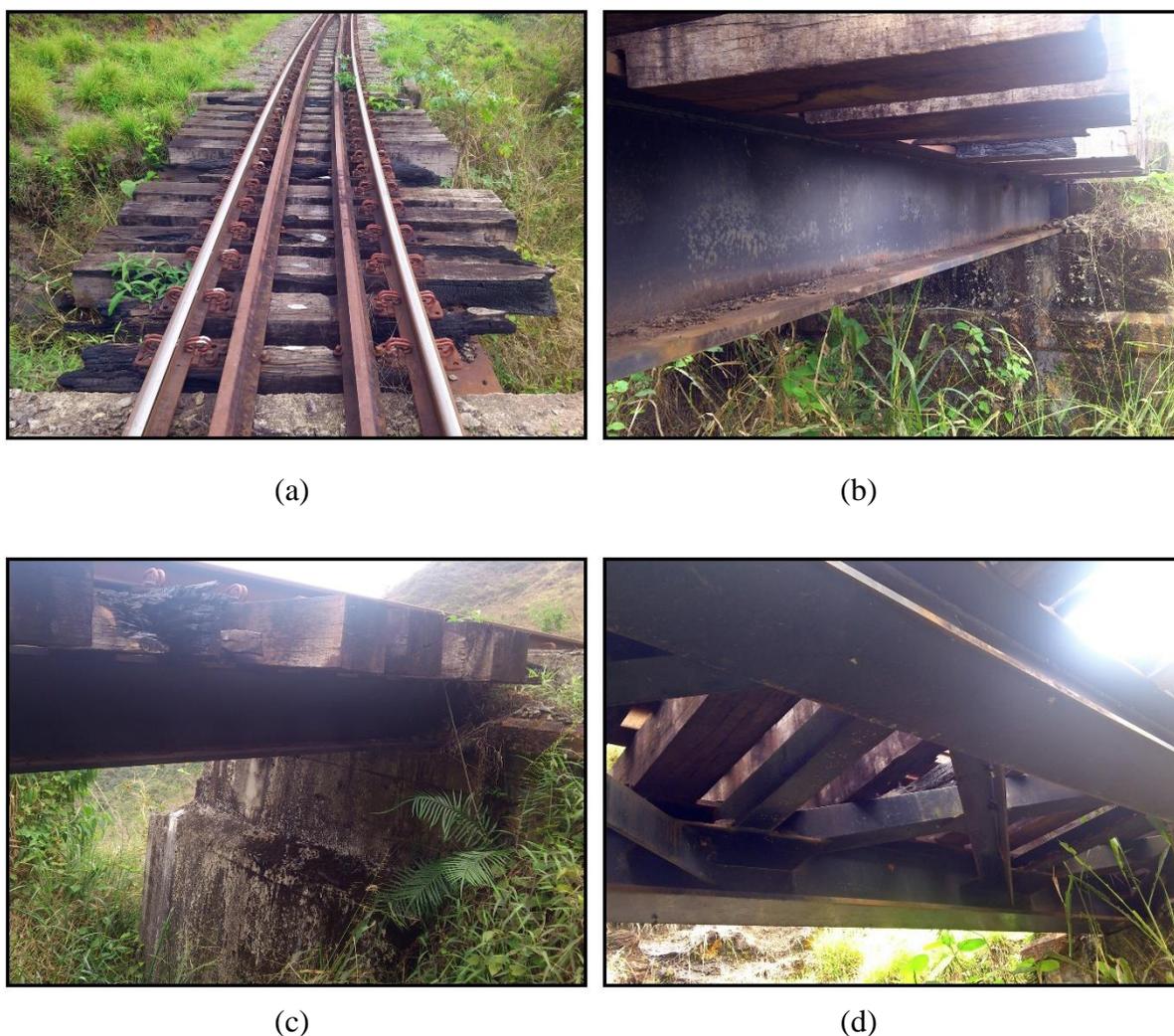
**Figura 4.21** – Seção transversal típica no meio do vão do “Pontilhão do km 11,30” da “Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”



**Figura 4.22** – Seção transversal típica na região dos apoios do “Pontilhão do km 11,30” da “Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”

#### 4.2.4.3 Registro fotográfico do “Pontilhão do km 11,30” da Ferrovia “Ouro Preto – Mariana”

A Figura 4.23 apresenta os principais aspectos do “Pontilhão do km 11,30”.



**Figura 4.23** – Registro fotográfico do “Pontilhão do km 11,30” (2014) da Ferrovia “Ouro Preto-Mariana”; (a) vista superior; (b) vista lateral; (c) detalhe do pilar; (d) detalhe do contraventamento inferior

#### 4.2.5 Inspeção no Viaduto de Mariana – km 17,84

O “Viaduto de Mariana” é uma obra que compõe o sistema viário da cidade de Mariana, e se revelou uma boa alternativa para que a composição férrea não interferisse no trânsito no centro da cidade. Projetado por Caetano Lopes Jr., em 1914 este viaduto apresenta a particularidade de não apresentar aparelho de apoio (CARDOSO, 2007).

#### 4.2.5.1 Ficha de Inspeção Cadastral do “Viaduto de Mariana/MG”

As principais características do “Viaduto de Mariana/MG” constam na ficha de Inspeção Cadastral, segundo Tabela 4.6.

**Tabela 4.6 – Ficha de Inspeção Cadastral do “Viaduto de Mariana/MG”**

1 DADOS BÁSICOS	
IDENTIFICAÇÃO / LOCALIZAÇÃO / JURISDIÇÃO	
Data: 21/07/2014	
OAE: Código: OAE-FICOM em 17/84 Nome / Referência: Viaduto de Mariana	
Tipo de Estrutura: Código TS-17 Natureza da Transposição: Código NT-3 Sistema Construtivo: Código SC-08 (VIDE TABELA 2.A) (VIDE TABELA 4.A) (VIDE TABELA 3.A)	
Malha: Centro-Leste Ferrovias: Central do Brasil Ramal: Ponte Nova UF: MG	
Trecho: Ouro Preto - Mariana Localização (km): 17,84 Cidade Prox.: Mariana	
Nível em relação ao mar: - Inspetor: Wagner Cavallare de Souza	
ADMINISTRAÇÃO	
Administrador: <input type="checkbox"/> RFFSA <input checked="" type="checkbox"/> CONCESSÃO <input type="checkbox"/> OUTROS	
Nome: FCA (Ferrovia Centro Atlântica S.A.) (para o caso concessão / outros)	
PROJETO / CONSTRUÇÃO	
Projetista: Caetano Lopes Junior Ano da Construção: 1914	
Construtor: Caetano Lopes Junior Arquivo: Pro.opm pt.170 Trem-Tipo Classe: TR 140 (atual)	
GEOMETRIA	
Comprimento (m): 5,50 Largura (m): 1,45 Altura (m): 0,42 Nº de vãos: 1 Comp. Dos Vãos (m) 5,50	
Altura da Viga no Apoio (m): 0,42 Altura da Viga no Vão (m): 0,42 Altura Máxima de Pilar (m): 3,00 Comprimento do Vão Maior (m): 5,50	
Comentários:	
2 DADOS SOBRE CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS	
CARACTERÍSTICAS PLANI-ALTIMÉTRICAS	
Região: <input checked="" type="checkbox"/> PLANA <input type="checkbox"/> ONDULADA <input type="checkbox"/> MONTANHOSA Greide: Rampa Máxima (%): zero	
Traçado: <input checked="" type="checkbox"/> TANGENTE <input type="checkbox"/> CURVO Raio (m): Travessia: <input checked="" type="checkbox"/> ORTOGONAL <input type="checkbox"/> ESCONSA	
CARACTERÍSTICAS DA VIA	
Bitola da via (m): 1,00 Trilho: <input checked="" type="checkbox"/> Simples <input type="checkbox"/> Duplo Drenos: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
Nº de vias: 1 (uma) Passarela: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO Tubulação de Utilidade Pública:	
Estrado: <input checked="" type="checkbox"/> Sup. <input type="checkbox"/> Inf. Dormente: <input checked="" type="checkbox"/> Madeira <input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Concreto <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
GABARITOS	
Para Viaduto: Horizontal (m): 3,38 Vertical (m):	
Para Ponte s/ Rio Navegável: Horizontal (m): Vertical (m):	
Proteção dos Pilares Contra Choque de Embarcação? <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO	
ACESSO	
Viaduto de Acesso: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO Nº de vãos: Comp. Dos Vãos (m)	
Tipo de Estrutura: Código Natureza da Transposição: Código Sistema Construtivo: Código	
PEDESTRE:	
Passarela de Pedestre: <input type="checkbox"/> SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO Nº de vãos: Comp. Dos Vãos (m)	
Tipo de Estrutura: Código Natureza da Transposição: Código Sistema Construtivo: Código	
TRÁFEGO	
Característica do Tráfego: <input checked="" type="checkbox"/> Ferroviário <input type="checkbox"/> Roroferroviário Nº de Composições/Dia (Média): 3 vezes	
Comentários:	

## 3 CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL

## MATERIAIS/SEÇÃO TIPO

COMPONENTE	MATERIAL (CÓDIGO) (VER TABELA 5.A)	SEÇÃO TIPO (CÓDIGO) (VER TABELA 6.A)
ESTRADO	AC	VT
VIGAS PRINCIPAIS	AC	VT
PILARES	PD	RGI
FUNDAÇÕES	IG	IG

## TABELA 1.A - TIPOS DE APARELHOS DE APOIO

Cód.	Descrição
CR	Cremalheira
NP	Elastomérico (Neoprene)
FR	Fixo metálico com Rotula de Aço
FM	Fixo Metálico (Chapa de Aço)
RM	Rolo Metálico
RA	Rolo Metálico com articulação superior
PD	Pêndulo Metálico
PC	Pêndulo em Concreto Armado
FR	Articulação Freyssinet
CH	Placa de Chumbo
LP	Ligação Pórtico
TE	Tipo especial
NI	Não informado

## Aparelhos de Apoio (VIDE TABELA 1.A)

Local	→	Ponte / Pil. br	
Tipo	→	NI	

Comentários:

## 4 INTERVENÇÕES

## MANUTENÇÃO

Manutenção Anterior:  SIM  NÃO Data (última manutenção): \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Comentários:

## REFORMA

 Reforma Anterior:  SIM  NÃO Substituição de Meios de Ligação:  SIM  NÃO  
 Modificação estrutural:  SIM  NÃO Substituição de Elementos estrutural:  SIM  NÃO

Comentários: Reforma realizada em 2006/2007 relatada por Manoel Cardoso

## 5 OUTROS ASPECTOS

## PARTICULARIDADES

 Desnível Máx. entre Greide e Terreno: \_\_\_\_\_ m As Fundações encontram-se em Solo Mole?  SIM  NÃO  
 Lâmina D'água: Normal: \_\_\_\_\_ m na Cheia \_\_\_\_\_ m A vibração da Estrutura é Excessiva?  SIM  NÃO  
 O Meio Ambiente é Agressivo?  SIM  NÃO O Regime do Rio é Torrencial?  SIM  NÃO  
 A Seção de Vazão é Adequada?  SIM  NÃO O Leito do Rio é Erodível?  SIM  NÃO  
 Existe Drenagem no interior do caixão?  SIM  NÃO Estado de Conservação:  Boa  Regular  Ruim

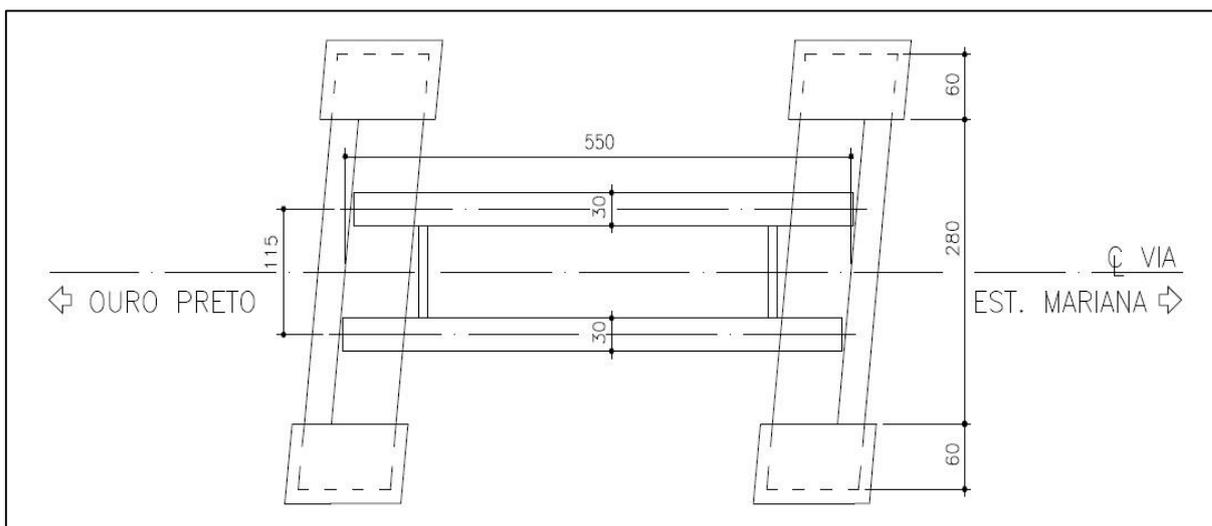
## INSPEÇÃO ROTINEIRA (PARÂMETROS DE PLANEJAMENTO)

 Melhor Época para Vistorias: Acessível em qualquer época do ano  
 Periodicidade:  Normal (2 anos)  Reduzida (1 ano)  Dilatada (4 anos)  Especial: 3 anos  
 Acesso Direto:  Sim  Não Equipamento Especial:  Sim  Não

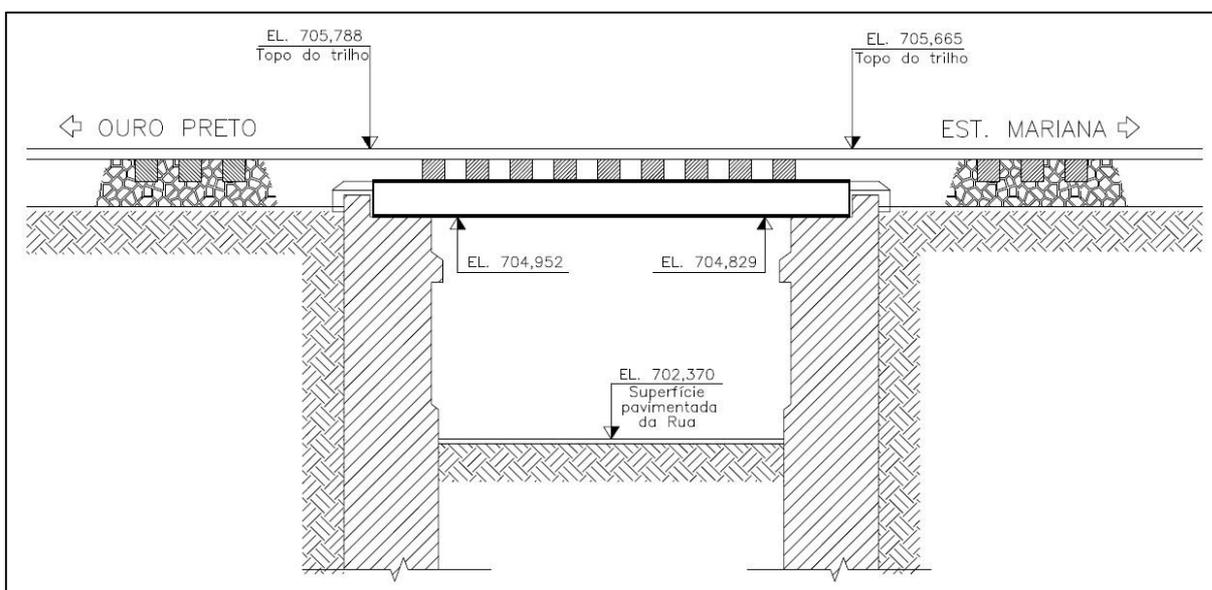
Comentários:

#### 4.2.5.2 Detalhamento arquitetônico e estrutural do “Viaduto de Mariana/MG”

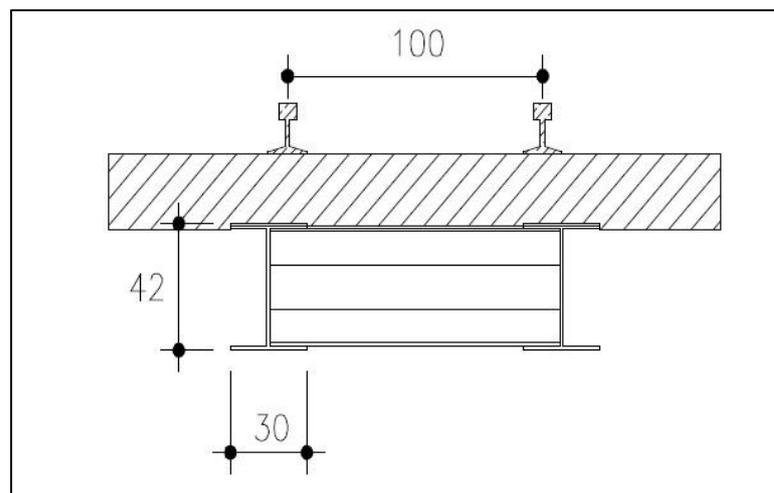
As dimensões do “Viaduto de Mariana/MG” constam nas Figuras 4.24 a 4.27 que abrangem planta, vista longitudinal e detalhes da seção transversal no meio do vão e na região dos apoios.



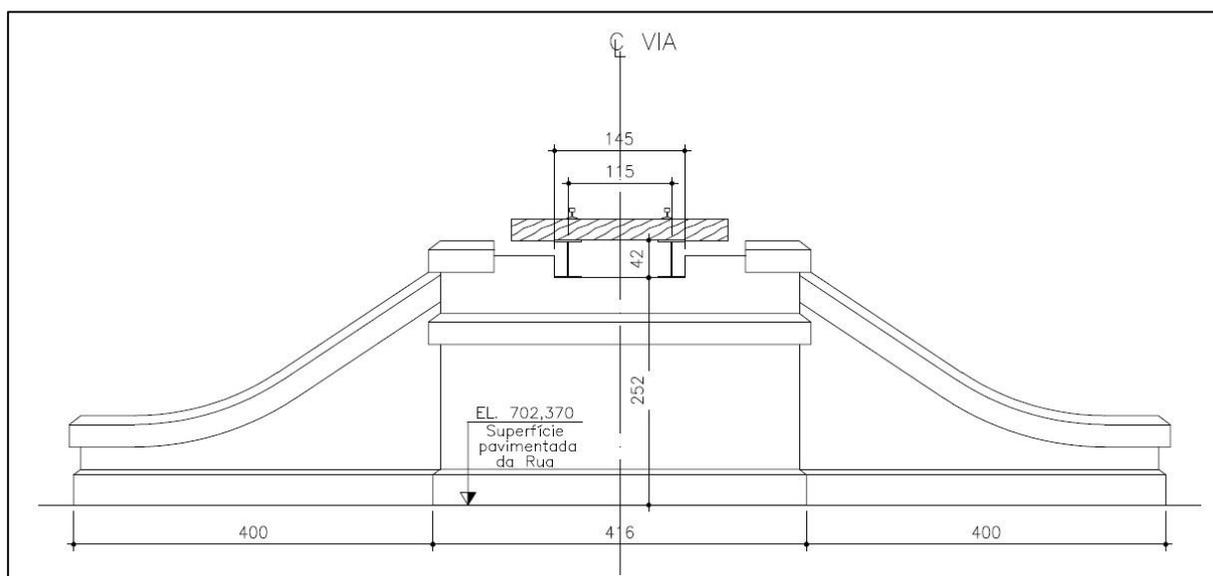
**Figura 4.24** – Planta do “Viaduto de Mariana/MG”



**Figura 4.25** – Vista longitudinal do “Viaduto de Mariana/MG”



**Figura 4.26** – Seção transversal típica no meio do vão do “Viaduto de Mariana/MG”



**Figura 4.27** – Seção transversal típica na região dos apoios do “Viaduto de Mariana/MG”

#### 4.2.5.3 Registro fotográfico do “Viaduto de Mariana/MG”

O registro fotográfico apresentado na Figura 4.28 refere-se aos aspectos mais relevantes do “Viaduto de Mariana/MG”.



**Figura 4.28** – Registro fotográfico do “Viaduto de Mariana/MG” (2014); (a) vista superior; (b) vista lateral; (c) detalhe do pilar; (d) detalhe da ausência de aparelho de apoio na estrutura

### 4.3 Patologias nas O.A.E.s da Ferrovia Ouro Preto – Mariana/MG

A corrosão foi o principal fator patológico na maioria das estruturas estudadas; no entanto os níveis de corrosão encontrados não foram suficientes para causar danos estruturais nas estruturas principais. O produto de corrosão mostra-se aderente e estável, o que de certa maneira foi suficiente para proteger a estrutura, contra intempéries.

Quadro mais grave de corrosão somente foi encontrado na “Ponte da Estação de Ouro Preto”, onde nesta ponte os elementos estruturais dos encontros ficaram por longo período de tempo parcialmente enterrados, neste caso o solo e a matéria orgânica sobre a superfície do

metal retêm umidade, o que acelera o fenômeno da corrosão, além da aeração diferencial entre o solo e a atmosfera. Este fato acarretou a esta parte da estrutura uma corrosão muito superior às demais, observando inclusive uma degradação excessiva na viga inferior e nos aparelhos de apoio. A Figura 4.29 ilustra o quadro de deterioração destacado.



**Figura 4.29** - Corrosão na viga inferior e no aparelho de apoio fixo da “Ponte da Estação”

A existência de uma tubulação de abastecimento de água da população local em condições precárias evidencia uma grande patologia encontrada. Passando pelos elementos estruturais da ponte e com um sistemático vazamento de água, essa tubulação é o principal fator para o desenvolvimento de espécies vegetais intensificando, assim, o processo corrosivo no aparelho de apoio móvel conforme destacado na Figura 4.30.



**Figura 4.30** – Tubulação de água e degradação no aparelho de apoio móvel da “Ponte da Estação”

Além da existência de vazamentos ou infiltrações, são fatores de risco para a ocorrência de corrosão: a idade avançada da estrutura, a falta de manutenção, a presença de ferrobactérias e a aeração diferencial. Os apoios também se encontram deteriorados de modo a colocar em dúvida seu desempenho sobre a Ponte Marechal Hermes, no Rio São Francisco, que liga Pirapora/MG e Buritizeiro/MG

Ainda avaliando a mesma estrutura percebeu-se a situação crítica que compromete a segurança da população na passarela de pedestres. Destaca-se esta estrutura merece atenção pois embora o trem turístico não utilize frequentemente a “Ponte da Estação” para seu trajeto, a população faz uso diário da passarela para transpor o rio que passa no local. A Figura 4.31 mostra a situação de degradação da passarela, no corrimão de proteção e na chapa de piso, respectivamente.



**Figura 4.31** - Corrosão na passarela de pedestres da “Ponte da Estação de Ouro Preto”

É importante ressaltar o tempo de duração da proteção da estrutura concluída em 2007 e já se encontra no estado apresentado na Figura 4.31.

Quanto à corrosão por frestas, houve um bom comportamento das estruturas em relação a este tipo de corrosão. Nos poucos casos observados, não houve danos consideráveis aos elementos estruturais. A justificativa para este fato pode ser encontrada no tipo de ligação, onde não há acúmulo de água entre os elementos estruturais; as chapas “gusset” utilizadas nas ligações são dispostas de forma a evitar o acúmulo de água.

BRINCK (2004), em seu trabalho na Ponte Marechal Hermes salienta que, “em decorrência da evolução do fenômeno de corrosão em elementos estruturais da ponte, particularmente em regiões entre uniões que geralmente são desenvolvidas frestas, o material sofreu intensa degradação, chegando ao colapso”.

Em termos mecânicos, não foi observado o fenômeno de flambagem global de montantes nem o rompimento por tração de diagonais como observado por CARDOSO (2007) antes do processo de restauração, mas observou-se o afrouxamento e até mesmo ausência de alguns rebites nas pontes que utilizam este tipo de ligação, a “Ponte da Estação de Ouro Preto” e a “Ponte da Barra”, ambas em Ouro Preto/MG. É recomendado que as ligações afetadas por este problema sejam restauradas com parafusos em substituição aos rebites danificados. Na Figura 4.32 tem-se um exemplo da ausência do elemento de ligação citado em componentes estruturais da “Ponte da Estação”.



**Figura 4.32** – Ausência de elemento de ligação da “Ponte da Estação”

A ausência ou afrouxamento dos elementos de ligações é uma patologia já relatada por CARDOSO (2007) e tem como solução a substituição destes por parafusos estruturais de alta resistência mecânica embora a concepção arquitetônica e cultural do conjunto fique prejudicada com a adição desse novo elemento. Reiterando a solução acima descrita, no relatório de inspeção de pontes realizados pela Empresa VLi (Valor Logística Integrada) em 2011, a mesma anomalia foi observada na ponte do km 94 do trecho entre São João Del Rei e Tiradentes-MG e a recomendação destacada é de “recuperação das ligações com aplicação de parafusos”.

A região inferior da viga e a sua maior proximidade com o leito do curso da água (se comparado com os demais elementos estruturais) é favorável ao acúmulo de umidade decorrente da condensação atmosférica comumente observada na região. As estruturas apresentam-se em grande parte do tempo molhadas acelerando o processo corrosivo nessa região conforme destacado na Figura 4.33.



**Figura 4.33** – Corrosão no Banzo inferior da “Ponte da Estação”

Nos outros dois pontilhões e no “Viaduto de Mariana”, além de pequenas deteriorações provocadas pela corrosão, não foi constatado pela equipe de inspeção a presença dos aparelhos de apoio (no pontilhão do km11,30 e no Viaduto de Mariana), caso já relatado por CARDOSO (2007) na época da recuperação do trecho. Este tipo de ponte, onde as vigas longitudinais se apoiam diretamente na cabeceira, constitui uma concepção estrutural não aceitável para os padrões atuais, pelo fato de ocorrer transmissão de momento fletor entre as vigas longitudinais e os encontros da ponte.

Fazendo uma comparação das patologias encontradas com os relatórios de inspeção anualmente realizados pela empresa responsável, VLi pode-se observar que as informações e relevâncias prestadas por esta última são superficiais e não apresentam estudos mais avançados para percepção dos problemas patológicos e sua prevenção. Nos últimos relatórios dos quais se obteve acesso, todas as partes de todas as estruturas encontram-se destacadas como “não há anomalias” citando apenas a existência de deformação no aparelho de apoio esquerdo da “Ponte da Estação” e a solução recomendada é “monitorar deformação do aparelho de apoio” conforme Figura 4.34.



**Figura 4.34** – Relatório de inspeção realizado pela Empresa VLi em 2011

Nos relatos de CARDOSO (2007), comprova-se que as estruturas passaram por processo de reforma com aplicação de pintura de acordo com especificações técnicas para estruturas metálicas. A especificação de limpeza da superfície de pintura se refere ao padrão ST-3 da Norma Sueca SIS 05 59 00/1967 que recomenda uma preparação mecânica de superfície, onde há remoção da camada de óxido e outros materiais não muito aderentes, por meio de ferramentas mecânicas manuais, tais como escovas rotativas, marteletes de agulhas, lixadeiras, etc. Após a limpeza, a superfície foi revestida com uma tinta “primer” e uma tinta de acabamento à base de resina epóxi. Também foram utilizadas cores diferentes entre demãos para facilitar a inspeção em cada etapa da pintura.

Segundo NUNES & LOBO (1990), o padrão ST-3 é um tipo de preparação precário, de rendimento de execução relativamente baixo. Dependendo do tipo de equipamento utilizado, este método de preparo de superfície, tem ainda a inconveniência e a possibilidade de polir a superfície e, como consequência, dificultar a adesão da tinta.

Segundo CASTRO (1999), o principal problema das tintas epóxi é a sua deterioração devido a exposição ao sol. Devido aos raios ultravioletas, estas tintas perdem o brilho superficial, tornando-se foscas. Quando tiver um “primer” ou tinta intermediária à base de epóxi, e a estrutura estiver exposta, a tinta de acabamento deverá ser poliuretana alifática devido à sua resistência às diversas intempéries e a sua boa aderência ao “primer” epóxi.

A Figura 4.35 apresenta o estado de deterioração do sistema de pintura da “Ponte da Estação”

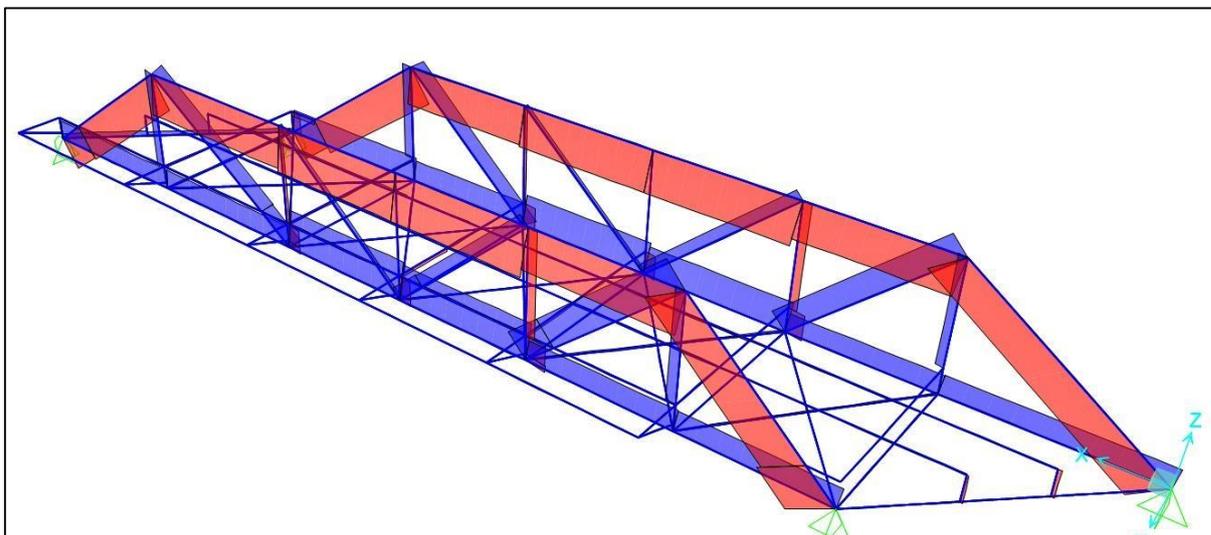


**Figura 4.35** – Deterioração do sistema de pintura da “Ponte da Estação de Ouro Preto”

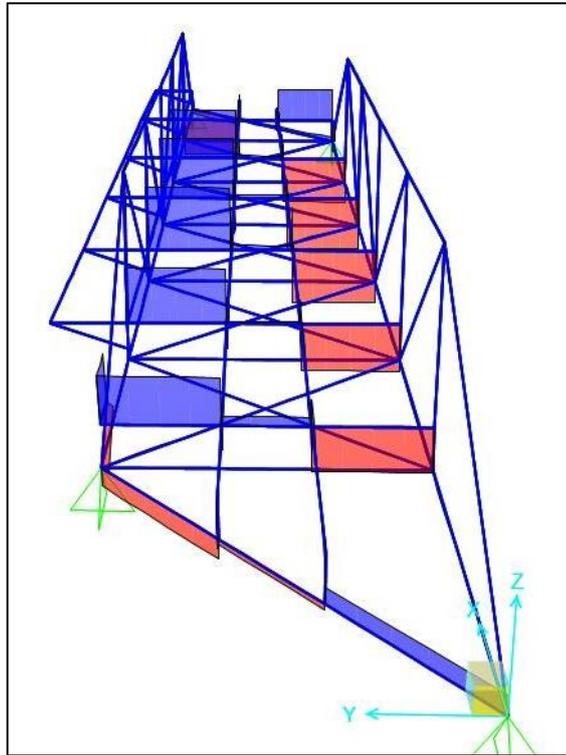
#### **4.4 Resultados da Análise Numérica**

A seguir serão apresentados os vários resultados obtidos da análise numérica da “Ponte da Estação de Ouro Preto” para a situação atual de seus elementos estruturais. A descrição detalhada da modelagem, tanto em termos de geometria quanto dos vários estágios de carregamentos, já foi apresentada no capítulo 3.

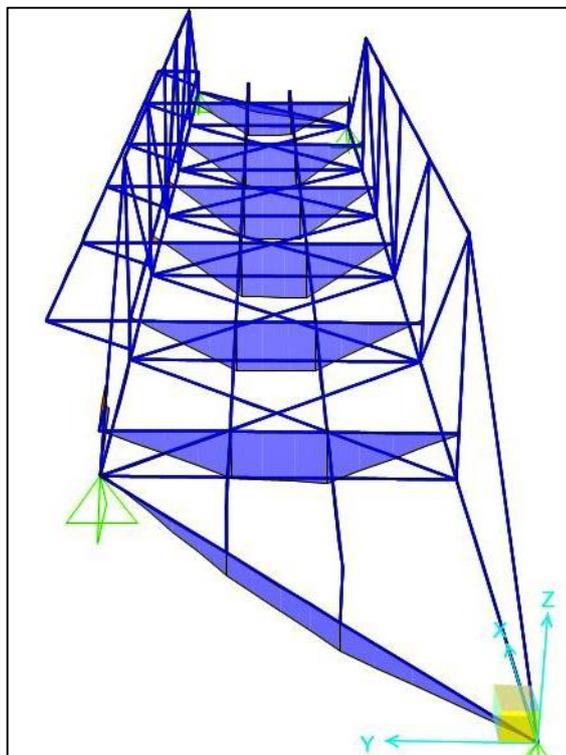
A partir das figuras a seguir pode-se determinar quais esforços são preponderantes para cada barra estrutural da ponte em estudo. Montantes, diagonais, banzo superior e inferior tem valores consideráveis de esforço normal, seja de tração ou de compressão conforme representado na Figura 4.36. As vigas perpendiculares ao eixo onde passa as composições férreas por sua vez, possui valores significativos de esforço cortante e momento fletor segundo Figuras 4.37 e 4.38, respectivamente. Verifica-se ainda, embasado nas Figuras 4.36-4.38, que as barras mais solicitadas da estrutura são as que se encontram na porção central da estrutura.



**Figura 4.36** – Elementos sujeitos a esforço normal na “Ponte da Estação de Ouro Preto”



**Figura 4.37** – Elementos sujeitos a esforço cortante na “Ponte da Estação de Ouro Preto”



**Figura 4.38** – Elementos sujeitos a momento fletor na “Ponte da Estação de Ouro Preto”

Todos os elementos foram avaliados pelos resultados de todas as combinações descritas e os máximos esforços atuantes estão apresentados na sequência. As Tabelas 4.7 a 4.12 apresentam os valores das solicitações extremas e a amplitude destas solicitações para as barras principais da “Ponte da Estação de Ouro Preto”.

Onde:

$N$  = Força Normal;

$V_y$  = Força Cortante na direção  $y$ ;

$V_z$  = Força Cortante na direção  $z$ ;

$M_y$  = Momento Fletor em relação ao eixo  $y$ ;

$M_z$  = Momento Fletor em relação ao eixo  $z$ .

**Tabela 4.7** – Solicitações extremas no banzo superior da PEOP

	Solicitações extremas no banzo superior da PEOP				
	N (kN)	$V_z$ (kN)	$V_y$ (kN)	$M_z$ (kN*m)	$M_y$ (kN*m)
COMB 1A = 2A	-2745,09	92,90	19,73	42,94	248,15
	-4526,62	-314,84	-68,09	-59,50	-53,19
COMB 2B	-1474,15	52,77	35,78	55,74	146,34
	-2657,27	-193,82	-44,94	-81,71	-33,95
COMB 3A = 4A	-2923,53	100,62	21,43	46,37	265,02
	-4906,85	-336,54	-72,50	-65,18	-56,80
COMB 3B = 4B	-1540,81	56,18	11,09	24,60	139,16
	-2693,27	-178,50	-36,29	-37,91	-29,88
COMB 4C	-1468,72	54,42	35,84	56,34	146,42
	-2735,41	-194,40	-44,55	-82,52	-34,41

**Tabela 4.8** – Solicitações extremas no banzo inferior da PEOP

	Solicitações extremas no banzo inferior da PEOP				
	N (kN)	$V_z$ (kN)	$V_y$ (kN)	$M_z$ (kN*m)	$M_y$ (kN*m)
COMB 1A = 2A	3878,25	10,54	32,87	51,33	43,45
	1765,88	-18,08	-15,35	-107,85	-16,88
COMB 2B	2266,38	8,08	24,16	60,66	24,25
	1023,76	-11,42	-9,94	-28,36	-18,47
COMB 3A = 4A	4187,47	11,22	34,95	55,04	47,20
	1900,63	-19,01	-16,62	-114,56	-17,68
COMB 3B = 4B	2281,21	8,23	17,69	27,53	24,67
	1041,04	-11,39	-8,49	-57,90	-9,94
COMB 4C	2316,94	8,34	24,19	60,68	24,93
	1042,26	-11,46	-10,11	-27,59	-18,55

**Tabela 4.9** – Solicitações extremas nas diagonais da PEOP

	Solicitações extremas nas diagonais da PEOP				
	N (kN)	V <sub>z</sub> (kN)	V <sub>y</sub> (kN)	M <sub>z</sub> (kN*m)	M <sub>y</sub> (kN*m)
COMB 1A = 2A	2146,34	25,49	18,52	15,40	13,10
	300,33	-9,29	-4,47	-18,82	-10,89
COMB 2B	1258,07	14,43	10,09	9,10	7,40
	155,65	-6,19	-2,68	-11,02	-6,27
COMB 3A = 4A	2329,24	26,80	19,81	16,64	13,51
	319,58	-10,49	-4,82	-20,25	-11,74
COMB 3B = 4B	1278,67	13,30	9,89	8,74	6,73
	173,77	-6,64	-2,48	-10,26	-6,35
COMB 4C	1297,39	13,98	10,06	9,34	7,33
	155,48	-6,82	-2,74	-11,11	-6,39

**Tabela 4.10** – Solicitações extremas nos montantes da PEOP

	Solicitações extremas nos montantes da PEOP				
	N (kN)	V <sub>z</sub> (kN)	V <sub>y</sub> (kN)	M <sub>z</sub> (kN*m)	M <sub>y</sub> (kN*m)
COMB 1A = 2A	813,38	53,70	346,23	199,50	41,42
	-1404,73	-46,09	-159,85	-101,48	-39,48
COMB 2B	439,32	29,74	215,09	123,17	24,60
	-817,17	-23,62	-83,27	-63,08	-22,52
COMB 3A = 4A	867,41	54,88	380,86	217,65	45,08
	-1519,87	-49,17	-166,70	-105,96	-42,03
COMB 3B = 4B	451,23	24,32	209,21	116,73	24,96
	-825,68	-24,66	-82,10	-51,81	-21,70
COMB 4C	437,97	27,09	225,87	127,48	25,49
	-839,64	-23,45	-79,20	-63,37	-22,45

**Tabela 4.11** – Solicitações extremas nas vigas transversais ao eixo longitudinal da PEOB

	Solicitações extremas nas vigas perpendiculares ao eixo longitudinal da PEOB				
	N (kN)	V <sub>z</sub> (kN)	V <sub>y</sub> (kN)	M <sub>z</sub> (kN*m)	M <sub>y</sub> (kN*m)
COMB 1A = 2A	545,34	879,80	65,77	83,85	1252,68
	-347,92	-826,76	-96,90	-76,68	-201,95
COMB 2B	431,35	500,33	35,58	52,66	724,21
	-214,28	-434,23	-58,86	-43,12	-123,75
COMB 3A = 4A	616,64	942,37	70,51	89,97	1339,57
	-368,73	-882,82	-103,80	-82,20	-220,34
COMB 3B = 4B	363,80	483,58	35,49	45,84	682,94
	-183,64	-449,97	-52,47	-41,59	-118,14
COMB 4C	465,87	501,61	35,65	52,86	723,60
	-210,72	-432,71	-58,92	-43,21	-128,13

**Tabela 4.12** – Solicitações extremas nas vigas longitudinais ao eixo longitudinal da PEOB

	Solicitações extremas nas vigas paralelas ao eixo longitudinal da PEOB				
	N (kN)	V <sub>z</sub> (kN)	V <sub>y</sub> (kN)	M <sub>z</sub> (kN*m)	M <sub>y</sub> (kN*m)
COMB 1A = 2A	232,86	587,02	71,76	32,31	273,73
	-148,80	-564,34	-93,65	-55,96	-271,93
COMB 2B	135,21	318,26	37,96	17,35	149,96
	-72,20	-306,30	-49,90	-29,74	-146,89
COMB 3A = 4A	249,34	628,30	76,83	34,62	293,42
	-159,01	-604,04	-100,35	-59,97	-290,70
COMB 3B = 4B	125,80	318,36	38,29	17,33	150,51
	-76,95	-306,09	-50,24	-30,09	-147,39
COMB 4C	135,22	318,22	37,90	17,35	150,55
	-71,52	-306,28	-49,92	-29,75	-146,57

Pelos resultados de todas as combinações estudadas verifica-se que os máximos esforços nos elementos estruturais ocorrem frequentemente para a COMB 3A = 4A. Tal combinação então, é mais importante, pois é a situação mais crítica que pode ocorrer na estrutura.

Segundo CARDOSO (2007) sobre sua análise estrutural na “Ponte da Barra” a análise numérica realizada indicou as diagonais tracionadas e os montantes próximos aos apoios como sendo os elementos mais críticos para a segurança global da ponte. Na estrutura real, também foram estes elementos que mais apresentaram problemas, o que vem a confirmar as

observações feitas *in loco*; porém, no objeto estudo de caso deste, para a situação mais crítica, tem-se as barras da porção central da estrutura como as mais solicitadas.

Confrontando os dados numéricos em sua situação mais desfavorável para a estrutura com as observações feitas na análise das patologias na mesma, pode-se afirmar que as peças mais deterioradas pela corrosão (peças que se encontram próximas à região inferior dos apoios) não são, portanto, as peças mais solicitadas pelo carregamento, o que, de certa forma, é uma observação favorável à situação atual da “Ponte da Estação”.

Sabe-se que que a grandeza denominada momento de inércia é um forte indicativo da resistência da peça estrutural à flexão, pois são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior o momento de inércia, menor a tensão que surgirá na peça, logo menor a deformação por flexão da estrutura. Observa-se, na Tabela 3.4, a grande dimensão da seção das vigas perpendiculares ao eixo da composição férrea (perfil nº 5 da Tabela 3.4) fazendo, assim, com que esta tenha um valor de momento de inércia para desempenhar satisfatoriamente a sua função. Avaliando o estado de deterioração dessas vigas na porção central da ponte, afirma-se que as mesmas não precisam de substituição atualmente.

## 5 CONCLUSÕES

A elaboração desse trabalho permite concluir:

- Verificou-se que o aço utilizado na “PEOP” apresenta em sua composição química, percentual de carbono muito baixo. Também foi observado uma microestrutura heterogênea e com grande quantidade de inclusões;
- Verificou-se, nas pontes pesquisadas, que a corrosão foi o fator patológico com o maior número de ocorrências, no entanto não houve significativa redução de seção, exceto para elementos inferiores e parcialmente enterrados nas cabeceiras da PEOP. Observou-se no estudo de caso deste, que o produto de corrosão não estava muito aderente sobre a superfície do aço, o que se recomenda monitoramento da estrutura e alguma ação efetiva para proteger o metal na atmosfera local;
- Os elementos estruturais de todas as pontes, na sua grande maioria são perfis compostos unidos por rebites, e por consequência com alto elevado número de frestas. Mesmo nestes locais com presença de frestas não foi detectado significativo ataque corrosivo com exceção dos vigamentos inferiores da PEOP;
- A ausência de aparelhos de apoio já descrita em literatura anteriores permanece nos pontilhões descritos no trecho, devendo atenção especial em inspeções futuras;
- Dentre as pontes estudadas, nenhuma apresentou problemas estruturais, com deformação plástica excessiva e rompimento de elementos estruturais. Mesmo assim e embasado no relatório de inspeção especial fez-se uma análise da PEOP devido ao quadro de patologias mais acentuado que as demais;
- O procedimento utilizado para a recuperação da PBOP em 2007 descaracterizou-a com a introdução de parafusos em substituição aos rebites e a montagem de uma nova estrutura metálica sob a estrutura já existente. Este procedimento depõe contra o propósito inicial da obra que é preservar a cultura e a história local;
- A passarela de acesso dos transeuntes construída em 2007 se mostra sem condições de segurança para o uso da população local exigindo melhorias

significativas desde a concepção de seus materiais para evitar a deterioração precoce como se verificou;

- Pode-se concluir, através das análise numérica, que as barras mais solicitadas da PEOP, são as localizadas no trecho central da ponte e que as mesmas não sofreram perdas de material significativas com o ataque da corrosão na estrutura;
- Os aparelhos de apoio e os banzos inferiores da PEOP tem a sua função estrutural comprometida devido à deterioração acentuada evidente na atualidade exigindo atenção especial nas próximas inspeções.

## 6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Para efeitos de continuidade dos estudos na mesma linha de pesquisa sugere-se que:

- Para a verificação numérico – computacional da estrutura da PEOP empregaram-se cargas referente ao trem-tipo TB-240 (indicado para a verificação da capacidade de carga de estruturas já existentes), no entanto, recomenda-se, se possível a instrumentação da ponte empregando-se de uma prova de carga, de maneira que permita obter resultados mais realistas;
- Também se recomenda a mesma verificação numérico – computacional da estrutura da PBOP com carregamentos reais obtidos através de instrumentação da ponte. Esta recomendação consta no trabalho de Cardoso, (2007) e até então não foi realizada;
- Além dos ensaios laboratoriais e análises realizadas por este trabalho é de fundamental importância que se faça o ensaio de fadiga para se determinar o limite e outros parâmetros de fadiga do material utilizado nas pontes, já que este é um método de colapso preocupante para Estruturas Metálica de Pontes. Este ensaio é importante em virtude da natureza cíclica do carregamento. Em futuras inspeções de pontes, também é importante a verificação de trincas empregando-se de ensaios não destrutivos;
- Com os resultados dos esforços máximos obtidos para a PEOP recomenda-se a elaboração de um dimensionamento estrutural baseado na Norma NBR8800/2008;
- Recomenda-se estudos avançados sobre o sistema de pintura empregado no restauro mencionado por Cardoso, (2007) para avaliar a eficácia do mesmo e/ou necessidade de manutenção ou ainda, substituição do mesmo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, R.O. **Inspeção de pontes**. FSA - Ferrovia Sul Atlântico S.A., Curitiba, 1999.
- ALMEIDA, W. L. **Análise do comportamento mecânico e dos aspectos macro e microestruturais do ferro fundido nodular submetido a ciclos térmicos de soldagem**. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Belo Horizonte, MG. 116p. 2014
- AFONSO, D. F. **Verificação a fadiga de pontes metálicas ferroviárias**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 178p. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NB 2/1961: Cálculo e execução de pontes de concreto armado**. Rio de Janeiro, 1961
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123/1988. Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7187/1987. Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7188/1982. Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre**. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7189/1985. Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias**. Rio de Janeiro, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8800/2008. Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9607/2012. Prova de carga em estruturas de concreto armado e protendido - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15307/2006. Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.

ASTM - E8M - **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, 2011

BARKER, R. M. e PUCKETT J. A. **Design of Highway Bridges: An LRFD Approach**. 3.Ed. New Jersey, 544 p, 2013.

BELLEI, I. H. Pontes, viadutos e passarelas: uma travessia de fascínio, orgulho e desenvolvimento. **Revista Construção Metálica**, São Paulo-SP, ed. 71, p. 8-13, 2005.

BENÉVOLO, A. **Introdução à história ferroviária do Brasil. Estudo social, político e histórico**. Recife: Edições Folha da Manhã. 1953.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro**. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A.. 1ed. Rio de Janeiro. 1979.

BRINCK, F. M. **Efeito da corrosão na integridade estrutural da Ponte Metálica Marechal Hermes**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Mestrado em Construção Metálica. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. MG, 177p. 2004.

CALLISTER, Jr. W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro. LTC. 7 ed. 2008.

CÂNDIDO, L. C. **Aços – Notas de aula do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFOP**. 25p., Ouro Preto. 2005.

CARDOSO, M. G. **Avaliação da integridade estrutural de pontes metálicas da ferrovia turística entre Ouro Preto e Mariana (MG) por meio de modelagem numérica e técnicas laboratoriais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Mestrado em Construção Metálica. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. MG, 195p., 2007.

CASTRO, E. M. C. **Patologia dos edifícios em estrutura metálica**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Mestrado em Construção Metálica. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. MG, 1999.

CATAI, E. **Análise dos efeitos da retração e fluência em vigas mistas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2005.

CBCA, Centro Brasileiro da Construção em Aço (2005). **Aços Estruturais**. Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.cbca-ibs.org.br/aços\\_estruturais.asp](http://www.cbca-ibs.org.br/aços_estruturais.asp)>. 2005. Acesso em: 04 set. 2014

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, 7. ed. - 2005.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de Aço – Conceitos, Técnicas e Linguagem**. 6. ed. São Paulo, Zigurati Editora, 297 p. 2008

DNIT. **Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias**. 2. ed. Rio de Janeiro, 253p., (IPR, Publicação 709.) 2004.

FÓFANO, S.: JAMBO, H. **Corrosão - Fundamentos, Monitoração e Controle**. Edição Revisada. Ed. Ciência Moderna Ltda, RJ 2009.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5ªed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007.

GONÇALVES, R. M. **Alguns Aspectos Relativos à Inspeção e Recuperação de Pontes de Aço – Ênfase em Pontes Ferroviárias**. Tese de doutorado, Departamento de estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos. SP, 1992.

GONZAGA, R. A. **Influence of ferrite and pearlite content on the mechanical properties of ductile cast irons**. Materials Science and Engineering A, v. 567, p. 1-8, 2013.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Blücher, 2009. 344p.

MACÊDO, F.B. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção) -Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. MG, 41p. 2009.

MATTOS, T. S. **Programa para análise de superestruturas de pontes de concreto armado e protendido**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ, 2001.

MAZARIM, D. M. **Histórico das pontes estaiadas e sua aplicação no Brasil**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP, 125p. 2011.

NORTON, R.L. **Machine design**. New Jersey: Prentice-Hall. 1048p. 1998.

NUNES, C. **Utilização de métodos de análise de falhas em um sistema de sinalização ferroviária**. Monografia de Especialização. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. RJ, 92p. 2012.

NUNES, L. P. e LOBO, A. C. O. **Pintura Industrial na Proteção Anticorrosiva**. p. 1-33, Rio de Janeiro. RJ, 1998.

OLIVEIRA, R. M. **Influência da adição de cobre e manganês nas propriedades de ferros fundidos nodulares**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina. SC, 50p. 2005.

PANNONI, F. D. **Parafusos estruturais de aço patinável na construção em aço**. Centro Brasileiro de Construção em Aço - CBCA. São Paulo, jul/ago. 2013. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/artigos-tecnicos-ler.php?cod=5893&bsc=,>> Acesso em: 25 mar 2014.

PFEIL, W. **Pontes Curso Básico**. Editora Campos Ltda. Rio de Janeiro, RJ, 1983.

PINHO, F.O. (1998). **Projeto de pontes metálicas**. Volta Redonda, RJ, Curso de capacitação - Escola de Engenharia e Informática de Volta Redonda

PRAVIA, Z.M.C. (2003). **Estabilidade de estruturas de pontes metálicas com fraturas**. 135p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro. 2003.

QUINTELLA, M. **Linhas apagadas**. Artigo de Jornal de Brasil, 13/10/2004.

SANTOS, N.E. **Conservação e reabilitação de pontes metálicas**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. Portugal, 239p., 1998.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A – Ficha de Inspeção Cadastral**

1 DADOS BÁSICOS	
IDENTIFICAÇÃO / LOCALIZAÇÃO / JURISDIÇÃO	
Data: ____ / ____ / ____	
OAE: Código: _____	Nome / Referência: _____
Tipo de Estrutura: Código _____ (VIDE TABELA 2.A)	Natureza da Transposição: Código _____ (VIDE TABELA 4.A)
Sistema Construtivo: Código _____ (VIDE TABELA 3.A)	
Malha: _____	Ferrovía: _____
Ramal: _____ UF: _____	
Trecho: _____	Localização (km): _____
Cidade Prox.: _____	
Nível em relação ao mar: _____	Inspetor: _____
ADMINISTRAÇÃO	
Administrador: _____	<input type="checkbox"/> RFFSA <input type="checkbox"/> CONCESSÃO <input type="checkbox"/> OUTROS
Nome: _____ (para o caso concessão / outros)	
PROJETO / CONSTRUÇÃO	
Projetista: _____	Ano da Construção: _____
Construtor: _____	Arquivo: _____
Trem-Tipo Classe: _____	
GEOMETRIA	
Comprimento ( m ): _____	Largura ( m ): _____
Altura ( m ): _____	Nº de vãos: _____
Comp. Dos Vãos ( m ) _____	
Altura da Viga no Apoio (m): _____	Altura da Viga no Vão (m): _____
Altura Máxima de Pilar (m): _____	
Comprimento do Vão Maior (m): _____	
Comentários: _____ _____ _____	
2 DADOS SOBRE CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS	
CARACTERÍSTICAS PLANI-ALTIMÉTRICAS	
Região: <input type="checkbox"/> PLANA <input type="checkbox"/> ONDULADA <input type="checkbox"/> MONTANHOSA	Greide: Rampa Máxima (%): _____
Traçado: <input type="checkbox"/> TANGENTE <input type="checkbox"/> CURVO	Raio ( m ): _____
Travessia: <input type="checkbox"/> ORTOGONAL <input type="checkbox"/> ESCONSA	
CARACTERÍSTICAS DA VIA	
Bitola da via ( m ): _____	Trilho: <input type="checkbox"/> Simples <input type="checkbox"/> Duplo
Nº de vias: _____	Passarela: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO
Estrado: <input type="checkbox"/> Sup. <input type="checkbox"/> Inf.	Dormente: <input type="checkbox"/> Madeira <input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Concreto
Drenos: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
Tubulação de Utilidade Pública: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
GABARITOS	
Para Viaduto: Horizontal ( m ): _____	Vertical ( m ): _____
Para Ponte s/ Rio Navegável: Horizontal ( m ): _____	Vertical ( m ): _____
Proteção dos Pilares Contra Choque de Embarcação? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
ACESSO	
Viaduto de Acesso: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Nº de vãos: _____
Comp. Dos Vãos ( m ) _____	
Tipo de Estrutura: Código _____	Natureza da Transposição: Código _____
Sistema Construtivo: Código _____	
PEDESTRE:	
Passarela de Pedestre: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Nº de vãos: _____
Comp. Dos Vãos ( m ) _____	
Tipo de Estrutura: Código _____	Natureza da Transposição: Código _____
Sistema Construtivo: Código _____	
TRÁFEGO	
Característica do Tráfego: <input type="checkbox"/> Ferroviário <input type="checkbox"/> Roroferroviário	Nº de Composições/Dia (Média): _____
Comentários: _____ _____ _____	

3 CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL														
MATERIAIS / SEÇÃO TIPO														
<b>COMPONENTE</b>	<b>MATERIAL (CÓDIGO) (VER TABELA 5.A)</b>	<b>SEÇÃO TIPO (CÓDIGO) (VER TABELA 6.A)</b>												
ESTRADO														
VIGAS PRINCIPAIS														
PILARES														
FUNDAÇÕES														
<b>Aparelhos de Apoio (VIDE TABELA 1.A)</b> Local → <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table> Tipo → <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>														
<b>Comentários:</b> _____ _____ _____														
<b>4 INTERVENÇÕES</b> MANUTENÇÃO														
Manutenção Anterior: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO      Data (ultima manutenção): ____ / ____ / ____														
<b>Comentários:</b> _____ _____ _____														
<b>REFORMA</b>														
Reforma Anterior: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO      Substituição de Meios de Ligação: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO Modificação estrutural: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO      Substituição de Elementos estrutural: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO														
<b>Comentários:</b> _____ _____ _____														
<b>5 OUTROS ASPECTOS</b> PARTICULARIDADES														
Desnível Máx. entre Greide e Terreno: _____ m      As Fundações encontram-se em Solo Mole? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO Lâmina D'água: Normal: _____ m      na Cheia _____ m      A vibração da Estrutura é Excessiva? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO O Meio Ambiente é Agressivo? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO      O Regime do Rio é Torrencial? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO A Seção de Vazão é Adequada? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO      O Leito do Rio é Erodivel? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO Existe Drenagem no interior do caixão? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO      Estado de Conservação: <input type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Ruim														
<b>INSPEÇÃO ROTINEIRA (PARÂMETROS DE PLANEJAMENTO):</b>														
Melhor Época para Vistorias: _____ Periodicidade: <input type="checkbox"/> Normal (2 anos) <input type="checkbox"/> Reduzida (1 ano) <input type="checkbox"/> Dilatada (4 anos) <input type="checkbox"/> Especial : _____ Acesso Direto: <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não      Equipamento Especial: <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não														
<b>Comentários:</b> _____ _____ _____														

**ANEXO B – Ficha de Inspeção Periódica (Rotineira)**

1. IDENTIFICAÇÃO / LOCALIZAÇÃO		Data: ___/___/___	
OAE: Código: _____	Nome / Referência: _____		
Malha: _____	Ferrovias: _____	Ramal: _____	UF: _____
Trecho: _____	Localização (km): _____	Cidade Prox.: _____	
Inspeção: <input type="checkbox"/> RFFSA	<input type="checkbox"/> Outra Entidade: _____		
Nível em relação ao mar: _____	Inspetor: _____		
2. COMENTÁRIOS GERAIS			
Cond. de Estabilidade: <input type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Sofrível <input type="checkbox"/> Precária	Cond. de Conservação: <input type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Sofrível <input type="checkbox"/> Ruim		
Nível de Vibração do Tabuleiro: <input type="checkbox"/> Normal <input type="checkbox"/> Intenso <input type="checkbox"/> Exagerado			
Inspeção Especializada (Realizada por Engenheiro de Estruturas). Necessária? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Urgente? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO		
Já houve alguma inspeção anteriormente? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO			
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: _____			
3. ESTRADO / SUPERESTRUTURA		NOTA TÉCNICA <input type="checkbox"/>	
Presença de Corrosão: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Red. Seção transversal: <input type="checkbox"/> Pouco <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Muito <input type="checkbox"/> Presença de furo		
Local e Tipos: (Vide Tabela B1) → _____			
Defeito de Ligação: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Deslizamento de elemento de ligação: <input type="checkbox"/> Pouco <input type="checkbox"/> Muito <input type="checkbox"/> Colapso		
Local e Tipos: (Tabela B3 ou B4) → _____			
Estado de Conservação da pintura: (Tabela B2) → _____			
Fissura Fina: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Trinca Exposta: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Estricção Excessiva: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Elemento Estrutural Rompido: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Flambagem Local de Elemento Estrutural: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Flambagem Global de Elemento Estrutural: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Deslocamento Exagerado de Viga principal: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Falha na impermeabilização: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Defeito em Junta de Dilatação: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Acúmulo de solo e Detritos: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Acúmulo de Água: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: _____			
4. MESOESTRUTURA		NOTA TÉCNICA <input type="checkbox"/>	
Há Armadura Exposta? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Há Concreto Deteriorado? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Há Fissuras e Trinças? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Há Desaprumo ou Deslocamento de Pilar? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Há Fratura em Pilares? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
Há Aparelho de Ineficiente? <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local / Quant.: _____		
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: _____			

5. INFRAESTRUTURA		NOTA TÉCNICA
Há Recalque de Fundação?	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
Há Deslocamento de Fundação?	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
Há Erosão no Terreno de Fundação?	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
Há Estacas Desenterradas?	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: _____		
6. FERROVIA		NOTA TÉCNICA
Há Irregularidades nos Trilhos?	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Especifique: _____
Junta de Dilatação dos Trilhos:	<input type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Faltando/Inoperante	
Ancoragem dos Trilhos:	<input type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Faltando Poucos Elementos de Ancoragem <input type="checkbox"/> Faltando Muitos Elementos de Ancoragem	
Ancoragem dos Dormentes:	<input type="checkbox"/> Boa <input type="checkbox"/> Faltando Poucos Elementos de Ancoragem <input type="checkbox"/> Faltando Muitos Elementos de Ancoragem	
Há dormente Danificado?	<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	Local /Quant.: _____
OBSERVAÇÕES ADICIONAIS: _____		
7. Croqui da Estrutura		
<div style="border: 1px solid black; height: 400px; width: 100%;"></div>		

TABELA B1 - TIPOS DE CORROSÃO	
Cód.	Descrição
UNI	Uniforme
GAL	Galvânica
PLA	Por placas
ALV	Alveolar
PIT	Puntiforme ou por Pite
FRE	Por frestas
ESF	Por esfoliação
STS	Sob tensão
INT	Inter Granular

TABELA B2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO DA PINTURA	
GRAU	Descrição
C1	Em bom estado de conservação
C2	Poucas Manchas de Corrosão
C3	Muitos pontos de Corrosão
C4	Sofrível
C5	Nunca foi pintada

TABELA B3 - PATOLOGIAS EM SOLDAS	
Cód.	Descrição
TRI	Trinca - Descontinuidade bidimensional produzida pela ruptura local do material.
FFU	Falta de Fusão - Fusão incompleta entre a zona fundida e o metal de base, ou entre passes da zona fundida.
COM	Concavidade - Reentrância na raiz da solda.
COE	Concavidade Excessiva - Solda em ângulo com a face excessivamente côncava.
DEF	Deformação Angular - Distorção angular da junta soldada em relação à configuração de projeto.
DEP	Deposição Insuficiente - Insuficiência de metal na face da solda.
DES	Desalinhamento - Junta soldada de topo, cujas superfícies das peças, embora paralelas, apresentam-se desalinhadas, excedendo a configuração de projeto.
CRA	Crateras - Trinca localizada na cratera do cordão de solda, podendo ser: longitudinal, transversal ou estrela.
FPE	Falta de Penetração - Insuficiência de metal na raiz da solda.
ERA	Ângulo Excessivo de Reforço - Ângulo excessivo entre o plano da superfície do metal de base e o plano tangente ao reforço de solda, traçado a partir da margem da solda.
REX	Reforço Excessivo - Excesso de metal da zona fundida, localizado na face da solda.
SAÁ	Solda em Ângulo Assimétrico - Solda em ângulo, cujas pernas são significativamente desiguais em desacordo com a configuração do projeto.
MOR	Mordedura - Depressão sob a forma de entalhe, no metal de base acompanhando a margem da solda.
PRE	Perfuração - Furo na solda ou penetração excessiva localizada resultante da perfuração do banho de fusão durante a soldagem.
POS	Poros Superficial - Vazio arredondado, isolado que emerge a superfície da solda.
POR	Porosidade - Conjunto de poros internos à solda ou superficiais.
RES	Respingo - Glóbulos de metal de adição transferidos durante a soldagem e aderidos à superfície do metal de base ou à zona fundida já solidificada.
SOB	Sobreposição - Excesso de material da zona fundida sobreposto ao metal de base na margem da solda, sem estar fundido ao metal de base.

TABELA B4 - PATOLOGIAS EM LIGAÇÕES PARAFUSADAS E REBITADAS	
Cód.	Descrição
PRO	Parafuso Rompido - Cisalhamento do fuste do parafuso devido à tensão cisalhante ou axial superior à resistência do parafuso ou por esmagamento podendo Causar grande deformação à estrutura.
PDO	Parafuso Dobrado - Em parafusos longos, dependendo da solitação, podem ocorrer momentos capazes de dobrar o parafuso.
CHA	Chapa Rasgada ou Esmagada - Rasgamento ou esmagamento da chapa junto ao parafuso (ou rebite) ou em toda a seção transversal devido a falhas de projeto ou alteração nos níveis de carregamento. Podendo levar a estrutura a grandes deslocamentos.
PAC	Parafuso Curto - Quando o parafuso não ultrapassar dois fios da rosca a porca.
FAL	Furo Alargado - Quando o diâmetro do furo for superior ao diâmetro do parafuso + 1/16" ou diâmetro do rebite x 1,06.
PIN	Parafuso Inclinado - Quando o parafuso não estiver perpendicular à chapa de ligação.
PSA	Parafuso Sem Arruela - Quando for constatada a inexistência de arruela do lado da porca.
COR	Corrosão - Quando for observada a corrosão, considerando se as formas e graus definidos anteriormente.
RRO	Rebite Rompido - Mesma condição de PRO
RDO	Rebite Dobrado - Mesma condição de PDO
RAC	Rebite Curto - Mesma condição de PAC.
RIN	Rebite Inclinado - Mesma condição de PSA.
RST	Rebite Solto - Quando for observado rebites com o fuste aparente.
CRD	Cabeça do Rebite Defeituosa - Má rebitagem, podendo causar deslizamento das chapas de ligação e concentração de tensões.
RFX	Rebite Frouxo - Identificado Através de marteladas em rebites escolhidos por amostragem.

Observação: Esta Ficha de Inspeção Periódica tem por objetivo facilitar os trabalhos de campo, sendo, apoiada nos trabalhos de GONÇALVES (1992), CARNEIRO (2005), e publicação do DNIT (2004). Onde este último trabalho segue a orientações do FHWA, Federal Highway Administration, e da AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, onde pontifica o Bridge's Inspector Training Manual / 90, editado pelo FHWA em Julho/1991

NOTA	DANOS NO ELEMENTO/ INSUFICIÊNCIA ESTRUTURAL	AÇÃO CORRETIVA	CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE	CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA PONTE
5	Não há danos nem insuficiência estrutural	Nenhuma	Boa	Obra sem problema
4	Há algum dano, mas há sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural	Pequenos serviços de manutenção	Boa/regular	Obra sem problema importante
3	Há danos gerando alguma insuficiência estrutural, porém sem comprometimento da estabilidade global da ponte	A recuperação da obra pode ser postergada, devendo-se, porém, neste caso, colocar o problema em observação sistemática.	Regular	<b>Obra potencialmente problemática</b> Recomenda-se acompanhar a evolução dos problemas através de Inspeção Periódica, para identificar em tempo hábil eventual agravamento do quando patológico.
2	Há danos gerando significativa insuficiência estrutural na ponte, porém não há ainda, aparentemente, um risco eminente de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) da obra deve ser feita no curto prazo	Ruim	<b>Obra problemática</b> Postergar demais a recuperação da obra pode leva-la a um estado crítico, implicando também sério comprometimento da vida útil da estrutura. inspeções excepcionais são recomendáveis para monitorar os problemas.
1	Há danos gerando grave insuficiência estrutural na ponte; o elemento em questão encontra-se em estado crítico, havendo um risco eminente de colapso estrutural	A recuperação (geralmente com reforço estrutural), substituição do elemento danificado ou demolição da obra.	Precária	<b>Obra crítica</b> Em alguns casos, pode configurar uma situação de emergência, podendo a recuperação da obra ser acompanhada de medidas preventivas especiais, tais como: restrição de carga na ponte, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramentos provisórios, instrumentação com leituras contínuas de deslocamentos e deformações.