



**Alexsandro Barbosa Silva**

**Programa de Inspeção para Ponte Rolante  
Baseado em Risco**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Concentração: Mecânica dos Sólidos.

Orientador: José Luiz de França Freire

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2004



**Alexsandro Barbosa Silva**

**Programa de Inspeção para Ponte Rolante  
Baseado em Risco**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica – Mecânica dos Sólidos - pelo Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

**Prof. José Luiz de França Freire**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Arthur Martins Barbosa Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Tito Luiz da Silveira**

Departamento de Engenharia Mecânica – UFRJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de Dezembro de 2004.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Alexsandro Barbosa Silva**

Graduou-se em Engenharia Mecânica, pela USS - Universidade Severino Sombra em 1996.

Ficha Catalográfica

Silva, Alexsandro Barbosa

Programa de inspeção para ponte rolante baseado em risco / Alexsandro Barbosa Silva ; orientador: José Luiz de França Freire. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

203 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Ponte rolante. 3. IBR - Inspeção Baseada em Risco. I. Freire, José Luiz de França. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

A Deus, por ter iluminado meu caminho ao longo de todos estes anos, a minha esposa e filho, Joelma e Miguel, aos meus pais, Antônio e Leila, e ao meu irmão, Fábio, pelo carinho e incentivo ao meu trabalho.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Prof. José Luiz de França Freire por toda a ajuda durante a realização deste trabalho.

A minha esposa Joelma, pelo amor, pelo carinho e pelo incentivo ao longo destes anos.

Ao meu filho Miguel por ter sido uma das maiores fontes de incentivo para a realização deste trabalho.

Aos meus pais Antônio Silva Junior e Leila Maria Barbosa Silva, que me proporcionaram as maiores riquezas que um homem pode alcançar, o estudo e o conhecimento.

Aos funcionários da ThyssenKrupp Fundições Ltda pelo ótimo convívio e pela ajuda na análise e obtenção dos dados de manutenção e inspeção das pontes rolantes da empresa.

## Resumo

Silva, Alexsandro Barbosa; Freire, José Luiz de França (Orientador). **Programa de Inspeção para Ponte Rolante Baseado em Risco**. Rio de Janeiro, 2004. 203p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Tradicionalmente, os equipamentos de elevação e transporte assumem uma posição de destaque na indústria, sendo as pontes rolantes os equipamentos mais utilizados. No caso da ThyssenKrupp Fundições Ltda., as pontes rolantes são responsáveis pelas principais paralisações dos negócios, trazendo prejuízos financeiros e operacionais.

O emprego da IBR – Inspeção Baseada em Risco é bastante indicado para este tipo de equipamento, pois permite identificar as pontes rolantes que são críticas e deste modo estabelecer uma metodologia de inspeção eficiente, visando concentrar esforços nestes equipamentos de modo a reduzir seu risco de falha e garantir a manutenção dos negócios.

Neste trabalho analisou-se um conjunto de pontes rolantes e componentes críticos da empresa ThyssenKrupp Fundições Ltda.. Para se cumprir este objetivo, foi aplicada a metodologia de IBR qualitativa para a análise do banco de dados de manutenção e inspeção. A teoria de IBR qualitativa usou uma matriz de risco COF x FOF (Consequência de Ocorrência de Falhas X Frequência de Ocorrência de Falhas) onde cada uma das 20 pontes teve sua classe de risco estabelecida. Também foi feita a análise da frequência de falhas dos componentes de todas as 20 pontes através dos registros de inspeção e manutenção localizados dentro do período de janeiro de 1995 a junho de 2002. Após a determinação das pontes rolantes críticas (risco alto e muito alto) e componentes críticos, foi elaborado um programa de inspeção para o gerenciamento dos mesmos, através de tabelas e fichas de inspeção onde a nova frequência de inspeção foi calculada através da distribuição de probabilidade semi-empírica de Weibull. Além do programa de inspeção, foi proposta uma metodologia para análise dos resultados futuros obtidos com a aplicação do programa de inspeção e para proporcionar, através da realimentação do banco de dados, o contínuo aumento de sua eficiência.

## Palavras-chave

Ponte Rolante; IBR – Inspeção Baseada em Risco

## Abstract

Silva, Alexsandro Barbosa; Freire, José Luiz de França (Advisor). **Development of Risk-Based Inspection Plans for Overhead Cranes.** Rio de Janeiro, 2004. 203p. MSc. Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Traditionally, the transportation and elevation equipments assume a highlight position in the industry, being the overhead crane one of the mostly used equipments. As to the ThyssenKrupp Fundições Ltda, the overhead cranes are responsible for main causes for stopping of business, leading financial and operational lost.

The use of RBI – Risk Based Inspection is very well indicated for this type of equipment since it allows the identification of which overhead cranes are critical and in this way the establish a mean of efficient inspection methodology, aiming to concentrate efforts on these equipments so as to reduce their failure risk and to guarantee the maintenance of the business.

In this dissertation, a sub-set of overhead cranes and critical components of ThyssenKrupp Fundições Ltda was analyzed. In order to reach this objective, the RBI qualitative methodology was applied to the analysis of the maintenance and inspection database. The theory of the qualitative RBI used a risk matrix FOF x COF (Probability of Failure X Consequence of Failure) where each one of the 20 overhead crane had its class of risk established. Also, the components failure analysis frequency of all the 20 overhead cranes was made through the inspection registries situated in the period between January 1995 and June 2002. After determining the critical overhead crane (high and very high risk) and the critical components, an inspection program for their management was elaborated through means of table and inspection cards where the new inspection frequencies were determined through the Weibull distribution semi-empiric probability. Besides the inspection program, a methodology to analyze the future results obtained by the application of the inspection program was propose to offer suggestions for this continuous efficiency raise.

## Key-words

overhead cranes, RBI – Risk Based Inspection

# Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Introdução.....</b>  | <b>20</b> |
| 1.1 Motivação.....  | 20        |
| 1.2 Objetivos e Metodologia.....  | 21        |
| 1.3 Escopo.....   | 21        |
| <b>2 IBR - Inspeção Baseada em Risco.....</b>   | <b>23</b> |
| 2.1 IBR - Inspeção Baseada em Risco.....  | 23        |
| 2.1.1 Modelo de Aplicação da Inspeção Baseada em Risco para Pontes Rolantes.....                      | 25        |
| 2.2 MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM - Reliability - Centred Maintenance). [7].....   | 26        |
| 2.3 Comparação entre Inspeção Baseada em Risco (IBR) e Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC).29 |           |
| <b>3 Aplicação.....</b>   | <b>30</b> |
| 3.1 1ª Etapa – Análise do Banco de Dados de Manutenção e Inspeção.....                                | 32        |
| 3.2 2ª Etapa – Subdivisão das Pontes em Conjuntos de Componentes.....                                 | 33        |
| 3.3 3ª Etapa – Organização dos dados analisados por componentes em tabelas.....                       | 35        |
| 3.4 4ª Etapa – Determinação dos Componentes que Mais Falharam nas Pontes Rolantes.....                | 36        |
| 3.5 5ª Etapa – Determinação da Frequência de Ocorrência de Falhas (FOF).....                          | 37        |
| 3.6 6ª Etapa – Determinação da Consequência de Ocorrência de Falhas.....                              | 38        |
| 3.6.1 Consequência de Ocorrência de Falhas Referente à Interrupção dos Negócios.....                  | 38        |
| 3.6.2 Consequência de Ocorrência de Falhas Referente à Segurança.....                                 | 39        |
| 3.6.3 Consequência de Ocorrência de Falhas Referente ao Meio Ambiente.....                            | 39        |
| 3.6.4 Consequência de Ocorrência de Falhas a ser Trabalhada.....                                      | 39        |
| 3.7 7ª Etapa – Determinação da Matriz de Risco.....   | 40        |
| 3.8 8ª Etapa – Determinação das Pontes Rolantes e Componentes Críticos.....                           | 40        |
| 3.9 9ª Etapa – Determinação de Árvores de Falhas para as Pontes Rolantes Críticas.....                | 41        |
| 3.10 10ª Etapa – Determinação do Programa de Inspeção Baseado em Risco .....                          | 42        |
| <b>4 Resultados Gerais para Pontes Rolantes e seus Componentes.....</b>                               | <b>43</b> |
| 4.1 Ponte Rolante 6.....  | 43        |
| 4.2 Ponte Rolante 24.....   | 45        |
| <b>5 Análise dos Resultados .....</b>   | <b>48</b> |
| 5.1 Pontes Rolantes Críticas.....   | 48        |
| 5.1.1 Matriz de Risco.....  | 48        |
| 5.2 Componentes Críticos.....   | 51        |
| 5.3 Flexa da Viga Principal & Estado de Conservação das Pontes Rolantes.....                          | 55        |
| <b>6 Pontes Rolantes e Componentes Críticos.....</b>  | <b>58</b> |
| 6.1 Pontes Rolantes Críticas.....   | 58        |
| 6.2 Componentes Críticos.....   | 59        |
| 6.2.1 Componente Crítico 1 - Roda Motriz do Sistema de Translação da Ponte Rolante.....               | 65        |
| 6.2.2 Componente Crítico 2 - Cabo de Aço.....   | 66        |
| 6.2.3 Componente Crítico 3 - Eixo Motriz do Sistema de Translação da Ponte.....                       | 66        |
| 6.2.4 Componente Crítico 4 - Motoredutor do Sistema de Translação da Ponte.....                       | 67        |
| 6.2.5 Componente Crítico 5 - Guincho.....   | 68        |
| 6.3 Frequência de Inspeção.....   | 69        |



|  |            |
|--|------------|
| 6.3.1 Verificação das Distribuições de Frequência dos Componentes Críticos.....  | 72         |
| 6.3.2 Probabilidade de Falhas dos Componentes Críticos.....  | 75         |
| 6.3.2.1 Componente Crítico Roda Motriz do Sistema de Translação da Ponte.....  | 75         |
| 6.3.2.2 Componente Crítico Cabo de Aço da Ponte.....   | 76         |
| 6.3.2.3 Componente Crítico Eixo Motriz do Sistema de Translação da Ponte.....  | 77         |
| 6.3.2.4 Componente Crítico Motoredutor do Sistema de Translação da Ponte.....  | 78         |
| 6.3.2.5 Componente Crítico Guincho da Ponte.....   | 79         |
| 6.4 Métodos de Inspeção e Pontos a serem Abrangidos.....   | 82         |
| 6.4.6 Métodos de Inspeção e Pontos a serem Abrangidos para o Componente Crítico Roda Motriz do Sistema de Translação da Ponte..... | 83         |
| 6.4.7 Métodos de Inspeção e Pontos a serem Abrangidos para o Componente Crítico Cabo de Aço.....                                   | 85         |
| 6.4.8 Métodos de Inspeção e Pontos a serem Abrangidos para o Componente Crítico Eixo Motriz do Sistema de Translação da Ponte..... | 87         |
| 6.4.9 Métodos de Inspeção e Pontos a serem Abrangidos para o Componente Crítico Motoredutor do Sistema de Translação da Ponte..... | 88         |
| 6.4.10 Métodos de Inspeção e Pontos a serem Abrangidos para o Componente Crítico Guincho da Ponte.....                             | 89         |
| 6.5 Fichas de Inspeção.....  | 91         |
| 6.5.1 Ficha de Inspeção do Componente Crítico Roda Motriz do Sistema de Translação da Ponte.....                                   | 92         |
| 6.5.2 Ficha de Inspeção do Componente Crítico Cabo de Aço.....   | 93         |
| 6.5.3 Ficha de Inspeção do Componente Crítico Eixo Motriz do Sistema de Translação da Ponte.....                                   | 95         |
| 6.5.4 Ficha de Inspeção do Componente Crítico Motoredutor do Sistema de Translação da Ponte.....                                   | 96         |
| 6.5.5 Ficha de Inspeção do Componente Crítico Guincho da Ponte.....  | 97         |
| 6.6 Programa de Inspeção.....  | 98         |
| 6.7 Análise dos Resultados Futuros.....  | 98         |
| <b>7 Discussão.....</b>  | <b>100</b> |
| <b>8 Considerações Finais.....</b>   | <b>102</b> |
| 8.1 Introdução.....  | 102        |
| 8.2 Conclusão.....   | 102        |
| 8.3 Sugestões para Trabalhos Futuros.....  | 104        |
| <b>Anexo A Banco de Dados de Falhas das 20 Pontes Rolantes no Período de Janeiro de 1995 a Junho de 2002.....</b>                  | <b>107</b> |
| <b>Anexo B Método de Median Ranks.....</b>   | <b>140</b> |
| <b>Anexo C Fichas de Dados Técnicos das Pontes Rolantes.....</b>   | <b>141</b> |
| <b>Anexo D Falhas dos Componentes Críticos das Pontes Rolantes .....</b>   | <b>162</b> |
| <b>Anexo E Fatores que Influenciam as Falhas das Rodas.....</b>  | <b>177</b> |
| <b>Anexo F Critérios de Inspeção e Tipos de Falhas de Cabos de Aço .....</b>   | <b>188</b> |
| <b>Anexo G Programa de Inspeção Atualmente Utilizado pela ThyssenKrupp Fundições Ltda. ....</b>                                    | <b>201</b> |
| <b>Anexo H Planilha de Lançamento dos Dados das Falhas Levantados Durante as Inspeções das Pontes Rolantes .....</b>               | <b>203</b> |

## Lista de Figuras

|   |     |
|---|-----|
| Figura 2.1 – Desvio de inspeção típica e inspeção baseada em risco.....                         | 24  |
| Figura 2.2 – Sistema de inspeção baseado em risco.....  | 24  |
| Figura 3.1 – Fluxograma das Etapas de Elaboração do Programa de Inspeção.....                   | 31  |
| Figura 3.5 – Componentes Críticos da Ponte Rolante .....  | 36  |
| Figura 3.8 – Matriz de Risco para Pontes Rolantes.....  | 40  |
| Figura 5.1 – Pontes Rolantes Plotadas na Matriz de Risco.....                                   | 49  |
| Figura 5.8 – Gráfico - Flexa sem Carga e Flexa Admissível.....                                  | 57  |
| Figura 5.9 – Gráfico - Flexa com Carga e Flexa Admissível.....                                  | 57  |
| Figura 5.10 – Gráfico - (Flexa com Carga - Flexa sem Carga) e Flexa Admissível.....             | 57  |
| Figura 6.1 – Árvore de Falhas Geral.....  | 60  |
| Figura 6.2 – Árvore de Falhas do Sistema de Translação da Ponte Rolante.....                    | 60  |
| Figura 6.4 – Árvore de Falhas da Roda Motriz do Sistema de Translação da Ponte Rolante.....     | 61  |
| Figura 6.5 – Árvore de Falhas do Eixo Motriz do Sistema de Translação da Ponte Rolante.....     | 62  |
| Figura 6.6 – Árvore de Falhas do Motoredutor do Sistema de Translação da Ponte Rolante.....     | 63  |
| Figura 6.7 – Árvore de Falhas do Guincho da Ponte Rolante.....                                  | 64  |
| Figura 6.8 – Árvore de Falhas do Cabo de Aço da Ponte Rolante.....                              | 65  |
| Figura 6.9 – Roda Motriz do Sistema de Translação.....  | 65  |
| Figura 6.10 – Cabo de Aço do Sistema de Elevação de Carga.....                                  | 66  |
| Figura 6.11 – Eixo Motriz do Sistema de Translação.....   | 67  |
| Figura 6.12 – Motoredutor do Sistema de Translação.....   | 68  |
| Figura 6.13 – Guincho da Ponte.....   | 68  |
| Figura 6.28 – Probabilidade de Falha da Roda Motriz do Sistema de Translação da Ponte [14]..... | 76  |
| Figura 6.29 – Probabilidade de Falha do Cabo de Aço da Ponte [14].....                          | 77  |
| Figura 6.30 – Probabilidade de Falha do Eixo Motriz do Sistema de Translação da Ponte [14]..... | 78  |
| Figura 6.31 – Probabilidade de Falha do Motoredutor do Sistema de Translação da Ponte [14]..... | 79  |
| Figura 6.32 – Probabilidade de Falha do Guincho da Ponte [14].....                              | 80  |
| Figura 6.43 – Fluxograma de Análise dos Resultados Futuros.....                                 | 30  |
| Figura A.1– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 2.....                    | 109 |
| Figura A.2– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 3.....                    | 110 |
| Figura A.3– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 4.....                    | 111 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura A.4– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 5.....  | 112 |
| Figura A.5– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 6.....  | 114 |
| Figura A.6 – Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 7.....   | 117 |
| Figura A.7 – Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 12.....  | 118 |
| Figura A.8 – Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 13.....  | 120 |
| Figura A.9 – Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 16.....  | 122 |
| Figura A.10– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 17.....  | 124 |
| Figura A.11– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 19.....  | 125 |
| Figura A.12– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 21.....  | 126 |
| Figura A.13– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 22.....  | 127 |
| Figura A.14– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 24.....  | 129 |
| Figura A.15– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 25.....  | 131 |
| Figura A.16– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 27.....  | 132 |
| Figura A.17– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 28.....  | 134 |
| Figura A.18– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 29.....  | 136 |
| Figura A.19– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 33.....  | 138 |
| Figura A.20– Gráfico dos Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 41.....  | 139 |
| Figura D.1– Desgaste dos Flanges Laterais.....  | 162 |
| Figura D.2– Fragmentação da Superfície de Rolamento.....  | 163 |
| Figura D.3– Desgaste da Superfície de Rolamento.....  | 164 |
| Figura D.4– Desgaste da Engrenagem devido ao Engrenamento Inadequado.....   | 164 |
| Figura D.5– Desgaste do Cabo de aço e Ruptura dos Fios.....   | 167 |
| Figura D.6– Polia com desgaste do canal e proteções laterais.....   | 172 |
| Figura D.7– Desgaste do Gancho.....   | 173 |
| Figura D.8- Falha na união dos trilhos do caminho de rolamento.....   | 174 |
| Figura D.9- Falha na união e fixação dos trilhos do caminho de rolamento.....   | 175 |
| Figura D.10- Falha no flange lateral da roda motriz da ponte rolante.....   | 175 |
| Figura D.11– Desgaste localizado do trilho devido ao deslizamento da roda motriz.....   | 175 |
| Figura D.12- Alto nível de corrosão da viga principal da ponte rolante.....   | 176 |
| Figura E.1– Sistema de Lubrificação de Rodas de Pontes Rolantes.....  | 177 |
| Figura E.2– Sistema de Lubrificação de trilhos de Pontes Rolantes.....  | 178 |
| Figura E.3– Bomba do Sistema de Lubrificação de trilhos de Pontes Rolantes.....   | 178 |
| Figura E.4– Aplicação de roda com perfil cônico e trilho com cabeça abaulada.....   | 179 |
| Figura E.5– Aplicação de roda com perfil plano e trilho com cabeça abaulada.....  | 180 |
| Figura E.6– Aplicação de roda com perfil plano e trilho com cabeça plana.....   | 181 |
| Figura E.7– Tipo de Trilhos para Caminhos de Rolamento de Pontes Rolantes.....  | 182 |
| Figura E.8– Fixação de Trilhos em Leitos de Concreto.....   | 183 |
| Figura E.9– Fixação de Trilhos em Leitos de Estrutura Metálica.....   | 184 |
| Figura E.10– Alinhamento, Nivelamento e Congruência Admissíveis para Trilhos de Caminhos de Rolamento de Pontes Rolantes..... | 185 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura E.11– Distribuição de Tensões Ideal.....   | 186 |
| Figura E.12– Distribuição de Tensões Inadequada.....  | 186 |
| Figura E.13– Modelo Fotoelástico de Distribuição de Tensões Ideal entre Roda e trilho.....  | 187 |
| Figura F.1– Inspeção Interna em Uma Seção Contínua do Cabo (tensão zero).....   | 190 |
| Figura F.2– Inspeção Interna na Extremidade do Cabo (tensão zero).....  | 190 |
| Figura F.4– Arames partidos em uma perna, associados a um pequeno desgaste em um cabo com torção lang.....  | 191 |
| Figura F.5– Arames partidos em duas pernas, em uma polia de compensação e associados ao desgaste localizado severo, causados pelo travamento da polia (motivo para descarte).....   | 191 |
| Figura F.6– Um grande número de arames partidos, associados ao desgaste excessivo em um cabo de torção regular (motivo para descarte imediato).....   | 192 |
| Figura F.7– Arames partidos em várias pernas, em uma polia de compensação (e às vezes escondidos por essa polia - motivo para descarte).....  | 192 |
| Figura F.8– Exemplos de efeito progressivo do desgaste e da corrosão externa em um cabo de torção regular.....  | 193 |
| Figura F.9– Exemplo de corrosão interna acentuada (motivo para descarte imediato).....  | 194 |
| Figura F.10– Ondulação: deformação onde o eixo longitudinal do cabo assume a forma de hélice (motivo para descarte).....  | 194 |
| Figura F.11– Deformação tipo “gaiola de passarinho” de uma construção composta de diversas pernas (motivo para descarte imediato).....  | 195 |
| Figura F.12– Alma de aço saltada para fora, geralmente associada a uma deformação tipo “gaiola de passarinho” em posição adjacente, “muitas vezes causada pelo alívio repentino da tensão” (motivo para descarte imediato)..... | 195 |
| Figura F.13– Apenas uma perna afetada pela extrusão do arame (motivo para descarte imediato).....   | 196 |
| Figura F.14– Agravamento da falha da figura F.13 (motivo para descarte imediato).....   | 196 |
| Figura F.15– Aumento local do diâmetro de um cabo de aço de torção lang causado pela destorção da alma de aço resultante do carregamento de choque (motivo para descarte imediato).....   | 197 |
| Figura F.16– Aumento local do diâmetro do cabo, devido à saliência da alma de fibra, em uma condição degradada entre as pernas externas (motivo para descarte).....   | 197 |
| Figura F.17– Nó ou laço apertado severo (motivo para descarte imediato).....  | 198 |
| Figura F.18– Cabo de aço que foi dobrado durante a instalação, mas que foi colocado em operação, e está agora sujeito ao desgaste localizado e à frouxidão do arame (motivo para descarte).....                                 | 198 |
| Figura F.19– Exemplo de dobramento severo (motivo para descarte).....   | 198 |
| Figura F.20– Achatamento devido ao amassamento local, causando o desequilíbrio nas pernas e associado a arames partidos (motivo para descarte).....   | 199 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura F.21– Achatamento de um cabo composto de diversas pernas, causado pelo enrolamento incorreto no tambor (motivo para descarte).....   | 199 |
| Figura F.22– Deformação sob a forma de “achatamento”, onde há um desgaste local e muitos arames partidos, exemplo típico de um cabo que saltou para fora da ranhura da polia (motivo para descarte imediato).....   | 199 |
| Figura F.23– Redução local do diâmetro do cabo, à medida que as pernas externas tomam o lugar da alma de fibra, que se desintegrou (motivo para descarte).....  | 200 |
| Figura F.24– Efeitos cumulativos de vários fatores de deterioração, onde podemos observar o desgaste severo das camadas externas causando a frouxidão dos arames ao ponto que ocorre a formação de uma deformação tipo “gaiola de passarinho”, e há vários arames partidos (motivo para descarte imediato)..... | 200 |
| Figura G.1- Plano de Inspeção Atual da ThyssenKrupp Fundições Ltda.....   | 202 |

## Lista de Tabelas

|  |        |
|--|--------|
| Tabela 3.2 – Família de Pontes Rolantes Seleccionadas.....   | 32     |
| Tabela 3.3 – Conjuntos de componentes das pontes rolantes.....   | 34     |
| Tabela 3.4 – Falha dos Componentes da Ponte 4 no período de jan/1995 a jun/2002...   | 35     |
| Tabela 3.6 – Níveis de Frequência de Falhas - FOF.....   | 37     |
| Tabela 3.7 – Níveis de Consequência de Ocorrência de Falhas – COF.....   | 38     |
| Tabela 3.9 – Níveis de Consequência de Ocorrência de Falhas – COF e Frequência de Ocorrência de Falhas - FOF.....  | 41     |
| Tabela 4.1 – Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 6.....  | 44     |
| <br>Tabela 4.3 – Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 24.....   | <br>46 |
| Tabela 5.2 – Percentual Representativo das Pontes Rolantes Críticas na Família Pontes Rolantes.....  | 50     |
| Tabela 5.3 – Cálculo do Risco Total Para as 20 Pontes Rolantes.....  | 50     |
| Tabela 5.4 – Cálculo do Risco Total Para as 6 Pontes Rolantes Críticas.....  | 50     |
| Tabela 5.5 – Cinco Componentes Responsáveis Pelas Maiores Frequências de Manutenção de Cada Ponte Rolante.....   | 52     |
| Tabela 5.6 – Matriz Para Determinação dos Cinco Componentes Críticos da Família de Pontes Rolantes.....  | 53     |
| Tabela 5.7 – Componentes Críticos das Pontes Rolantes.....   | 54     |
| Tabela 6.1 – Pontes Rolantes Críticas.....   | 58     |
| <br>Tabela 6.14 – Intervalos Entre Falhas dos Componentes Críticos das Pontes Rolantes Críticas.....   | <br>70 |
| Tabela 6.15 – Fórmulas da Regra de Sturges [14].....   | 70     |
| Tabela 6.16 – Distribuição de Frequência de Falhas da Roda Motriz do Sist. Translação da Ponte.....  | 70     |
| Tabela 6.17 – Distribuição de Frequência de Falhas do Cabo de Aço da Ponte.....  | 71     |
| Tabela 6.18 – Distribuição de Frequência de Falhas do Eixo Motriz do Sist. Translação da Ponte.....  | 71     |
| Tabela 6.19 – Distribuição de Frequência de Falhas do Motoredutor do Sist. Translação da Ponte.....  | 71     |
| Tabela 6.20 – Distribuição de Frequência do Guincho da Ponte.....  | 71     |
| Tabela 6.21 – Distribuições de Frequências Teóricas [14].....  | 72     |
| Tabela 6.22 – Comparação da Frequência Relativa Acumulada da Amostra com as Frequências Teóricas para a Roda Motriz do Sistema de Translação da Ponte..... | 73     |
| Tabela 6.23 – Comparação da Frequência Relativa Acumulada da Amostra com as Frequências Teóricas para o Cabo de Aço da Ponte.....                          | 73     |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 6.24 – Comparação da Frequência Relativa Acumulada da Amostra com as Frequências Teóricas para o Eixo Motriz do Sistema de Translação da Ponte..... | 73  |
| Tabela 6.25 – Comparação da Frequência Relativa Acumulada da Amostra com as Frequências Teóricas para o Motoredutor do Sistema de Translação da Ponte..... | 74  |
| Tabela 6.26 – Comparação da Frequência Relativa Acumulada da Amostra com as Frequências Teóricas para o Guincho da Ponte.....                              | 74  |
| Tabela 6.27 – Expressão Matemática de Weibull [14].....  | 75  |
| Tabela 6.33 – Métodos de Inspeção do Componente Crítico Roda Motriz.....   | 84  |
| Tabela 6.34 – Métodos de Inspeção do Componente Crítico Cabo de Aço.....   | 86  |
| Tabela 6.35 – Métodos de Inspeção do Componente Crítico Eixo Motriz.....   | 87  |
| Tabela 6.36 – Métodos de Inspeção do Componente Crítico Motoredutor.....   | 88  |
| Tabela 6.37 – Métodos de Inspeção do Componente Crítico Guincho.....   | 90  |
| Tabela 6.38 – Ficha de Inspeção do Componente Crítico Roda Motriz.....   | 92  |
| Tabela 6.39 – Ficha de Inspeção do Componente Cabo de Aço.....   | 94  |
| Tabela 6.40 – Ficha de Inspeção do Componente Crítico Eixo Motriz.....   | 95  |
| Tabela 6.41 – Ficha de Inspeção do Componente Crítico Motoredutor.....   | 96  |
| Tabela 6.42 – Ficha de Inspeção do Componente Crítico .....  | 97  |
| Tabela A.1- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 2.....   | 108 |
| Tabela A.2- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 3.....   | 110 |
| Tabela A.3- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 4.....   | 111 |
| Tabela A.4- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 5.....   | 112 |
| Tabela A.5- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 6.....   | 113 |
| Tabela A.6- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 7.....   | 116 |
| Tabela A.7- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 12.....  | 118 |
| Tabela A.8- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 13.....  | 120 |
| Tabela A.9- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 16.....  | 121 |
| Tabela A.10- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 17.....   | 123 |
| Tabela A.11- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 19.....   | 125 |
| Tabela A.12- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 21.....   | 126 |
| Tabela A.13- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 22.....   | 127 |
| Tabela A.14- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 24.....   | 128 |
| Tabela A.15- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 25.....   | 130 |
| Tabela A.16- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 27.....   | 132 |
| Tabela A.17- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 28.....   | 133 |
| Tabela A.18- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 29.....   | 135 |
| Tabela A.19- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 33.....   | 137 |
| Tabela A.20- Planilha de Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 41.....   | 139 |
| Tabela C.1- Ficha Técnica da Ponte Rolante 2.....  | 142 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela C.2- Ficha Técnica da Ponte Rolante 3.....                               | 143 |
| Tabela C.3- Ficha Técnica da Ponte Rolante 4.....                               | 144 |
| Tabela C.4- Ficha Técnica da Ponte Rolante 5.....                               | 145 |
| Tabela C.5- Ficha Técnica da Ponte Rolante 6.....                               | 146 |
| Tabela C.6- Ficha Técnica da Ponte Rolante 7.....                               | 147 |
| Tabela C.7- Ficha Técnica da Ponte Rolante 12.....                              | 148 |
| Tabela C.8- Ficha Técnica da Ponte Rolante 13.....                              | 149 |
| Tabela C.9- Ficha Técnica da Ponte Rolante 16.....                              | 150 |
| Tabela C.10- Ficha Técnica da Ponte Rolante 17.....                             | 151 |
| Tabela C.11- Ficha Técnica da Ponte Rolante 19.....                             | 152 |
| Tabela C.12- Ficha Técnica da Ponte Rolante 21.....                             | 153 |
| Tabela C.13- Ficha Técnica da Ponte Rolante 22.....                             | 154 |
| Tabela C.14- Ficha Técnica da Ponte Rolante 24.....                             | 155 |
| Tabela C.15- Ficha Técnica da Ponte Rolante 25.....                             | 156 |
| Tabela C.16- Ficha Técnica da Ponte Rolante 27.....                             | 157 |
| Tabela C.17- Ficha Técnica da Ponte Rolante 28.....                             | 158 |
| Tabela C.18- Ficha Técnica da Ponte Rolante 29.....                             | 159 |
| Tabela C.19- Ficha Técnica da Ponte Rolante 33.....                             | 160 |
| Tabela C.20- Ficha Técnica da Ponte Rolante 41.....                             | 161 |
| Tabela F.1- Nº. de Arames Partidos Admissíveis em Cabos de Pernas Redondas..... | 188 |
| Tabela F.2- Nº. de Arames Partidos Admissíveis em Cabos Resistentes à Rotação.. | 189 |
| Tabela H.1- Planilha de Coleta de Dados de Falhas.....                          | 203 |



## Lista de Símbolos

|           |   |
|-----------|---|
| $d$       | Diâmetro nominal do cabo de aço   |
| $d_1$     | Diâmetro externo do cabo de aço deformado   |
| $t$       | Tonelada  |
| $m$       | Metro   |
| $mm$      | milímetros  |
| $h$       | Horas   |
| $i$       | Índice do Equipamento (número)  |
| $n$       | Número total de equipamentos do somatório   |
| $C_i$     | Custo por hora do equipamento parado  |
| $H_i$     | Número de horas que o equipamento parou (falhou) no período de janeiro de 1995 a junho de 2002  |
| $\Sigma$  | Somatório   |
| $R_c$     | Dureza Rockwell C   |
| ROL       | Dados de uma amostra organizados na ordem crescente ou decrescente                              |
| $R$       | Amplitude do ROL  |
| $N$       | Número de dados da amostra  |
| $K$       | Número de classes do ROL  |
| $H$       | Amplitude da classe do ROL  |
| $P_{mi}$  | Ponto médio da classe do ROL  |
| $f_i$     | Frequência de falha observada   |
| $f_{RSO}$ | Frequência de falha relativa simples observada  |
| $f_{RAO}$ | Frequência de falha relativa acumulada observada  |
| $\eta$    | Vida Característica ou intervalo de tempo entre “t e $t_0$ ” no qual ocorreram 63,2% das falhas |
| $t$       | Período de tempo o qual deseja-se calcular a probabilidade de falha                             |
| $t_0$     | Vida mínima ou confiabilidade intrínseca  |
| $F(t)$    | Probabilidade de falha para um determinado período de tempo “t”                                 |
| $\mu$     | Média   |
| $\sigma$  | Desvio padrão   |
| $\beta$   | Fator de forma da curva de distribuição de frequência   |

## Lista de Abreviaturas

|         |  |
|---------|--|
| PUC-Rio | Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro |
| DEM     | Departamento de Engenharia Mecânica                |
| IBR     | Inspeção Baseada em Risco                          |
| RBI     | Risk Based Inspection                              |
| MCC     | Manutenção Centrada em Confiabilidade              |
| RCM     | Reliability Centred Maintenance                    |
| FOF     | Frequência de Ocorrência de Falhas                 |
| COF     | Consequência de Ocorrência de Falhas               |
| AISE    | Association of Iron and Steel Engineers            |
| API     | American Petroleum Institute                       |

*“Contemple o mundo com novo frescor, com os olhos de um principiante. Saber que você não sabe e estar disposto a admitir isso sem desculpas nem acanhamento é ser fonte de verdade e preparar o terreno para aprender e progredir em qualquer atividade.”*

Epicteto, *A Arte de Viver*