



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 (Conseqüência 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 effiecnce raise.

Key-words

overhead cranes, RBI – Risk Based Inspection

Sumário

1 Introdução.....	20
1.1 Motivação.....	20
1.2 Objetivos e Metodologia.....	21
1.3 Escopo.....	21
2 IBR - Inspeção Baseada em Risco.....	23
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	
3 Aplicação.....	30
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 Conseqüência de Ocorrência de Falhas.....	38
3.6.1 Conseqüência de Ocorrência de Falhas Referente à Interrupção dos Negócios...38	
3.6.2 Conseqüência de Ocorrência de Falhas Referente à Segurança.....	39
3.6.3 Conseqüência de Ocorrência de Falhas Referente ao Meio Ambiente.....	39
3.6.4 Conseqüência 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
4 Resultados Gerais para Pontes Rolantes e seus Componentes.....	43
4.1 Ponte Rolante 6.....	43
4.2 Ponte Rolante 24.....	45
5 Análise dos Resultados	48
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
6 Pontes Rolantes e Componentes Críticos.....	58
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
7	Discussão.....	100
8	Considerações Finais.....	102
8.1	Introdução.....	102
8.2	Conclusão.....	102
8.3	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	104
Anexo A	Banco de Dados de Falhas das 20 Pontes Rolantes no Período de Janeiro de 1995 a Junho de 2002.....	107
Anexo B	Método de Median Ranks.....	140
Anexo C	Fichas de Dados Técnicos das Pontes Rolantes.....	141
Anexo D	Falhas dos Componentes Críticos das Pontes Rolantes	162
Anexo E	Fatores que Influenciam as Falhas das Rodas.....	177
Anexo F	Critérios de Inspeção e Tipos de Falhas de Cabos de Aço	188
Anexo G	Programa de Inspeção Atualmente Utilizado pela ThyssenKrupp Fundições Ltda.	201
Anexo H	Planilha de Lançamento dos Dados das Falhas Levantados Durante as Inspeções das Pontes Rolantes	203

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 Conseqüência de Ocorrência de Falhas – COF.....	38
Tabela 3.9 – Níveis de Conseqüência 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
Tabela 4.3 – Resultados Gerais das Falhas da Ponte Rolante 24.....	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
Tabela 6.14 – Intervalos Entre Falhas dos Componentes Críticos das Pontes Rolantes Críticas.....	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
Σ	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	Freqüência de falha observada
f_{RSO}	Freqüência de falha relativa simples observada
f_{RAO}	Freqüência de falha relativa acumulada observada
η	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”
μ	Média
σ	Desvio padrão
β	Fator de forma da curva de distribuição de freqüência

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	Freqüência de Ocorrência de Falhas
COF	Conseqüência 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*