

57.196

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

^{mt}
METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA
CONFIABILIDADE
EM FREIOS PNEUMÁTICOS AUTOMOTIVOS

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR ACIRES DIAS
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 30/07/96.

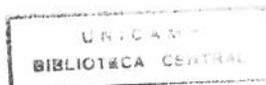
Carlos Amadeu Pallerosi
ORIENTADOR

Autor: Acires Dias

Orientador: Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi

1996

9614348



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	D543m
V. Ex.	
TEMPO B*	28563
PROC.	667/96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	13/05/96
N.º CPD	em.00091603

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D543m Dias, Acires
 Metodologia para análise da confiabilidade em freios pneumáticos automotivos / Acires Dias.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Carlos Amadeu Pallerosi.
 Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Confiabilidade (Engenharia). 2. Freios pneumáticos. 3. Pesquisa - Metodologia. 4. Pesquisa tecnológica. I. Pallerosi, Carlos Amadeu. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

Autor : Acires Dias

Orientador: Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Tese de Doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 30 de Julho de 1996

S.P. - Brasil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

Tese de Doutorado

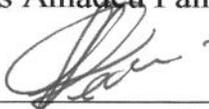
**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA
CONFIABILIDADE
EM FREIOS PNEUMÁTICOS AUTOMOTIVOS**

Autor : Acires Dias

Orientador: Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi



Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi



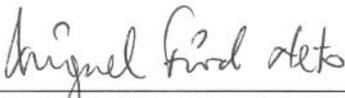
Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini



Prof. Dr. Robson Pederiva



Prof. Dr. Nelson Back



Prof. Dr. Miguel Fiod Neto

Campinas, 1996

à Fatima, ao Tiago e ao Lucas, pela beleza de
vivermos juntos.

Agradecimentos

Ao prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi, pela orientação e estímulo no decorrer do trabalho.

Aos professores João Plaza, Itamar Ferreira, Fernando Iguti, Franco G. Dedini e Kátia L. Dedini, pelas discussões sobre engenharia, ciência e vida.

Ao amigo Ruy Casão Jr. pela convivência fraterna e amiga.

Ao Márcio Roberto Stefani pela dedicação valorosa e inestimável na atividade de programação.

À Ana Maria Sabino e à Cristiane Grando que muito me ajudaram na revisão do texto.

Aos amigos do Laboratório Ferroviário, do DMC, do DPM e da FEM pelo convívio.

Aos engenheiros Nelson Flávio Dias Vanzetti e Alcides Edval Moretti da Freios Knorr, Wilson De Martini Marques, Antonio Carlos Vieira Vaquero e Germano Collobriari da freios Wabco e Adelino O. Arasake da Freios Warga, pela disposição em discutirem os problemas relacionados aos freios.

Aos nossos familiares e amigos pela torcida e pelo incentivo recebido nas diferentes fases pelas quais passamos, enquanto desenvolvíamos o trabalho.

Aos trabalhadores brasileiros que, através de seus impostos, sustentam a estrutura universitária neste País, meus especiais agradecimentos.

Sumário

Lista de figuras	vii
Lista de tabelas	xii
Nomenclatura	xiv
Resumo	xvi
Abstract	xvii
1. Introdução	1
1.1 Aspectos gerais	1
1.2 Aspectos específicos	2
1.3 Objetivos do trabalho	3
1.4 Conteúdo dos capítulos	5
2. Sistema de segurança veicular	8
2.1 Aspectos Gerais	8
2.2 Acidentes de Trânsito e manutenção automotiva no Brasil	9
2.3 Perspectiva internacional sobre a falha catastrófica	12
2.4 Confiabilidade e Segurança	13
2.5 Confiabilidade e Manutenção.	15
2.6 Soluções alternativas	17
2.7 Comentário	18

3. Confiabilidade do componente	19
3.1 Aspectos Gerais	19
3.2 Terminologia relativa à confiabilidade	20
3.3 Definição de confiabilidade	23
3.4 Definição matemática da confiabilidade	25
3.5 Equações da confiabilidade para a Distribuição de Weibull	29
3.5.1 Influência do parâmetro de forma (β)	31
3.5.2 Influência da taxa de falha (λ).	34
3.5.3 Influência dos parâmetros β e λ , simultaneamente.	37
3.6 Cálculo da probabilidade acumulada de falha pelo método da Categoria Mediana	39
3.7 Determinação dos parâmetros da equação de Weibull	40
3.8 Obtenção da Taxa de falha (λ) e parâmetro de forma (β) a partir de período até falha ou suspensão	42
3.9 Obtenção da Taxa de falha (λ) e parâmetro de forma (β) são conhecidos	45
3.10 Obtenção da Taxa de falha (λ) e parâmetro de forma (β) para uma confiabilidade desejada	47
3.11 Comentário	51
4. Confiabilidade de Sistemas	52
4.1 Introdução	52
4.2 Definições	52
4.2.1 Componente	52
4.2.2 Sensor	53
4.2.3 Comutador	55
4.2.4 Componente equivalente	55
4.3 Confiabilidade do componente equivalente	56
4.3.1 Equação geral	56
4.3.2 Parâmetros da equação de Weibull para Componente Equivalente.	58
4.3.3 Avaliação da precisão dos valores de β_{ce} e λ_{ce}	60
4.4 Influência do sensor sobre a confiabilidade	63

4.4.1	Caso 1: Componente sem sensor	64
4.4.2	Caso 2: Componente com sensor real.	65
4.4.3	Caso 3: Componente com sensor perfeito	67
4.5	Arranjos funcionais	69
4.5.1	Definição de componente reduzido	70
4.5.2	Arranjo série	71
4.5.3	Arranjo paralelo com redundância ativa	72
4.5.3.1	Redundância ativa com “um” componente bom em “n”	72
4.5.3.2	Redundância ativa com “k” componentes bons em “n”	73
4.5.3.2.1	Arranjo paralelo parcial com 2 itens bons em 3 ($k = 2$ e $n = 3$)	75
4.5.3.2.2	Arranjo paralelo parcial com 2 itens bons em 4 ($k = 2$ e $n = 4$)	75
4.5.3.2.3	Arranjo paralelo parcial com 3 itens bons em 4 ($k = 3$ e $n = 4$)	76
4.5.4	Redundância passiva	76
4.5.4.1	Redundância passiva quando todos os itens são iguais	76
4.5.4.2	Redundância passiva quando todos os itens são diferentes	77
4.6	Parâmetros da Equação de Weibull para componentes reduzidos	78
4.7	Comentário	79
5.	Circuito de freio pneumático	80
5.1	O sistema de freio	80
5.2	Freios automotivos	81
5.3	Circuito de freio pneumático	82
5.3.1	Circuito básico do freio pneumático para caminhão ou ônibus	84
5.3.2	Circuito básico do freio pneumático para caminhão com saída para o reboque ou semi-reboque	88
5.3.3	Circuito básico do freio pneumático para o reboque ou semi- reboque	90
5.3.4	Dispositivo de frenagem das rodas	93
5.4	Normas de freio pneumático	94
5.5	Comentário	95
6.	Desenvolvimento da Metodologia	97
6.1	Aspectos gerais	97
6.2	Aspectos específicos	99

6.2.1	Modelo físico	100
6.2.2	Identificação dos itens do sistema	101
6.2.3	Modelo confiabilístico	102
6.2.4	Modelo matemático	106
6.2.5	Programa computacional	106
6.3	Comentário	108
7.	Programa Computacional	109
7.1	Aspectos gerais	109
7.2	Breve histórico	110
7.3	O programa BRAKEREL	112
7.4	Banco de dados	112
7.4.1	Banco de dados de componentes	113
7.4.2	Banco de dados de sensor	113
7.4.3	Banco de dados de amostras	114
7.4.4	Banco de dados de circuito	117
7.4.4.1	Composição dos itens no circuito “freio 1”	118
7.4.4.2	Composição dos itens nos subsistemas da “atuação”	119
7.4.4.3	Composição dos itens nos “grupos de função”	120
7.4.5	Arranjo série/paralelo	120
7.5	Análise	123
7.5.1	Análise do componente	124
7.5.2	Análise do circuito	125
7.6	Configuração das saídas na forma de gráficos	127
7.6.1	Escala de Weibull	127
7.6.2	Escala Linear	129
7.7	Configuração na forma de tabelas	131
7.8	Comentário	132
8.	Estudo de Caso	133
8.1	Introdução	133
8.2	Modelo físico	133
8.3	Identificação dos itens do sistema	135

8.3.1	Relação geral dos componentes que podem fazer parte de um circuito de freio	135
8.3.2	Relação dos componentes para o circuito das figuras 8.1 e 8.2.	138
8.3.3	Descrição dos componentes do circuito de freio pneumático da Tabela 8.2 a serem usados no modelo confiabilístico	140
8.3.4	Modelo confiabilístico	146
8.3.5	Modelo confiabilístico para o circuito principal	148
8.3.5.1	Composição dos componentes para o subcircuito do freio dianteiro	151
8.3.5.2	Composição dos componentes do subcircuito do freio traseiro	154
8.3.5.3	Composição dos componentes do subcircuito do freio de emergência/estacionamento	155
8.3.5.4	Composição dos componentes do subcircuito de freio motor e auxiliares	157
8.3.5.5	Síntese do modelo confiabilístico para o circuito principal	158
8.3.6	ANÁLISE 1: O freio de emergência e o freio motor formam uma redundância ativa do freio de serviço	159
8.3.7	NÁLISE 2: O freio de emergência e o freio motor tem a mesma confiabilidade do freio de serviço ($CRCG026 = CRCG025$) e formam uma redundância passiva do freio de serviço, tendo o motorista na condição de comutador perfeito	162
8.3.8	ANÁLISE 3: repete-se a condição da análise 2 e tem a válvula de freio de mão (CO14) na condição de comutador real	164
8.3.9	Modelo confiabilístico para os subsistemas de “atuação”	166
8.3.9.1	Subsistema de “atuação” Pneumática (SP)	167
8.3.9.2	Subsistema de “atuação” Mecânica (SM)	170
8.3.9.3	Sistema de “atuação” Elétrica (SE)	172
8.3.9.4	Sistema de “atuação” eletrônica (ST)	173
8.3.9.5	Sistema de “atuação” Hidráulica (SH)	173
8.3.10	Modelo confiabilístico para grupos de função	173
8.3.10.1	Grupo Conexão Motor-Compressor (GMC)	174
8.3.10.2	Grupo Gerador de Energia (GGE)	174
8.3.10.3	Grupo Acumulador de Energia (GAE)	175
8.3.10.4	Grupo de Válvulas de Acionamento (GVA)	175
8.3.10.5	Grupo de Controle e Alerta (GCA)	175

8.3.10.6 Grupo de Freio Auxiliar (GFA)	176
8.3.10.7 Grupo de Eixo Dianteiro (GED)	176
8.3.10.8 Grupo de Eixo Traseiro (GET)	177
8.3.10.9 Grupo de eixo da Carreta (GEC)	177
8.3.10.10 Relação Pneu-Solo (RPS)	177
8.4 Obtenção das funções confiabilísticas do circuito de freio através do programa computacional BRAKEREL	178
8.4.1 Análise das funções confiabilísticas para o circuito principal (Figura 8.3)	178
8.4.2 Funções confiabilísticas para o circuito principal: ANÁLISE 1, ANÁLISE 2, ANÁLISE 3.	182
8.5 Comentário	184
9. Resultados e Conclusões	186
9.1 Análise dos resultados	186
9.2 Conclusões	187
9.2.1 Quanto aos objetivos	187
9.2.2 Quanto à segurança veicular	188
10. Sugestões para próximos trabalhos	190
11. Referências bibliográficas	192

Lista de Figuras

Figura 1. 1 - Correlações entre Confiabilidade (C), Manutenibilidade (M) e Disponibilidade (D) para produtos reparáveis.	3
Figura 2. 1 Confiabilidade recomendada para sistemas relacionados com a segurança veicular	12
Figura 2. 2 Percentual de acidentes causados por defeitos técnicos de sistemas relacionados com a segurança veicular	13
Figura 2. 3 Planejamento da manutenção em função da confiabilidade para um período de 10 anos.	16
Figura 3. 1 Função densidade de probabilidade de falha hipotética $f(x)$ em função da vida x .	27
Figura 3. 2 Influência de β sobre a Função densidade de probabilidade (fdp) para a escala linear.	32
Figura 3. 3 Influência de β sobre a tif para a escala linear.	33
Figura 3. 4 Influência de β sobre a confiabilidade para a escala linear.	33
Figura 3. 5 Influência de β sobre a não-confiabilidade para a escala linear	34
Figura 3. 6 Influência de β sobre a confiabilidade para a escala de Weibull.	34
Figura 3. 7 Influência de λ sobre a função densidade de probabilidade (fdp) para a escala linear.	35
Figura 3. 8 Influência de λ sobre a taxa instantânea de falha (fdp) para a escala linear.	36
Figura 3. 9 Influência de λ sobre a confiabilidade para a escala linear.	36
Figura 3. 10 Influência de λ sobre a não-confiabilidade para a escala linear	37
Figura 3. 11 Influência de λ e β sobre a fdp para a escala linear.	38

Figura 3. 12 Influência de λ e β sobre a função confiabilidade para a escala de Weibull.	38
Figura 3. 13 Tela do menu principal	43
Figura 3. 14 Tela de criação e de alteração das amostras	43
Figura 3. 15 Tela de inclusão do item na amostra	44
Figura 3. 16 Função não-confiabilidade para a VALV22 na escala de Weibull.	46
Figura 3. 17 Cadastro dos componentes e sensores	46
Figura 3. 18 Configuração da saída gráfica	49
Figura 3. 19 Confiabilidade na escala de Weibull para λ_0 variável, $\beta = 1$ e $x = 100.000$ km.	50
Figura 3. 20 Confiabilidade na escala de Weibull para λ_0 variável, $\beta = 1$ e $x = 1.000.000$ km.	50
Figura 4. 1 Representação esquemática do componente equivalente	55
Figura 4. 2 Gráfico da confiabilidade na escala de Weibull comparando a curva exata (azul) com as obtidos através de β_{cc} e λ_{cc} via RAMP(preto) e BRAKEREL(rosa)	63
Figura 4. 3 Representação esquemática de um componente sem sensor	64
Figura 4. 4 Representação esquemática de um componente equivalente com sensor real.	65
Figura 4. 5 Saída gráfica da confiabilidade na escala de Weibull para o componente, sensor e componente equivalente.	67
Figura 4. 6 Representação esquemática de um componente equivalente com sensor perfeito.	67
Figura 4. 7 Representação gráfica na escala linear do componente sem sensor (azul), com sensor real (preto) e com sensor perfeito (rosa).	69
Figura 4. 8 Representação esquemática do arranjo série	71
Figura 4. 9 Representação esquemática do arranjo paralelo puro onde CE_i representa o componente equivalente (i) e CR_j componente reduzido qualquer (j)	73
Figura 4. 10 Representação esquemática do arranjo paralelo parcial.	74
Figura 4. 11 Representação esquemática do arranjo paralelo com redundância passiva	77
Figura 4. 12 Representação esquemática do arranjo paralelo com redundância passiva $CE_A = CE_B$	78

Figura 5. 1 Representação esquemática do comando de frenagem	83
Figura 5. 2 Circuito de freio pneumático para caminhão ou ônibus, com dois eixos	86
Figura 5. 3 Circuito de freio pneumático do cavalo mecânico com saída para o reboque	90
Figura 5. 4 Circuito do freio para reboque/semi-reboque	92
Figura 5. 5 Dispositivo para a ação de frenagem mecânica	93
Figura 6. 1 Metodologia de análise	100
Figura 7. 1 Menu principal	113
Figura 7. 2 Cadastro de componentes	114
Figura 7. 3 Criação e alteração das amostras	115
Figura 7. 4 Inclusão dos itens nas amostras	116
Figura 7. 5 Valores calculados dos parâmetros da equação de Weibull	116
Figura 7. 6 Cadastro dos circuitos	118
Figura 7. 7 Tela de composição do circuito principal	119
Figura 7. 8 Tela de composição dos subsistemas de “atuação”	120
Figura 7. 9 Tela de composição dos grupos de função	121
Figura 7. 10 Arranjo série/paralelo para formar os componentes reduzidos do circuito principal	123
Figura 7. 11 Tela de análise da função confiabilística do componente	124
Figura 7. 12 Configuração de saídas gráficas	125
Figura 7. 13 Tela de análise da função confiabilística do componente reduzido	126
Figura 7. 14 Gráfico da função confiabilidade <i>versus</i> distância, para a escala de Weibull	128
Figura 7. 15 Função confiabilidade na escala linear.	130
Figura 7. 16 Função densidade de probabilidade de falha na escala linear	130
Figura 7. 17 “Zoom” da função confiabilidade do componente	131
Figura 8. 1 Circuito de freio pneumático básico para caminhão ou ônibus, com dois eixos	135
Figura 8. 2 Esquema básico do freio de sapatas	136
Figura 8. 3 - Modelo confiabilístico completo para o freio pneumático básico de caminhão e ônibus (figura 8.1), incluindo o freio de tambor (Figura 8.2)	150
Figura 8. 4 Síntese do modelo confiabilístico para o circuito de freio pneumático	151

Figura 8. 5 Seqüência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito dianteiro	153
Figura 8. 6 Seqüência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito traseiro	155
Figura 8. 7 Seqüência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito de estacionamento e emergência	157
Figura 8. 8 Seqüência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito do freio motor	158
Figura 8. 9 Modelo confiabilístico considerando os componentes reduzidos de cada subcircuito	160
Figura 8. 10 Síntese final do modelo confiabilístico para o circuito de freio pneumático considerando o freio de emergência na reserva ativa	162
Figura 8. 11 Modelo confiabilístico para a análise 2	163
Figura 8. 12 Síntese final do modelo confiabilístico para o circuito de freio pneumático considerando o freio de emergência na reserva ativa	164
Figura 8. 13 Modelo confiabilístico para a análise 3	165
Figura 8. 14 Síntese final do modelo confiabilístico para o circuito de freio pneumático considerando o freio de emergência e motor na reserva passiva e a válvula de freio de mão como comutador	166
Figura 8. 15 Síntese do modelo confiabilístico para o subsistema de “atuação” pneumática	170
Figura 8. 16 Síntese do modelo confiabilístico para o subsistema de “atuação” mecânica	171
Figura 8. 17 Síntese do modelo confiabilístico para o subsistema de “atuação” elétrica.	172
Figura 8. 18 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo de função motor-compressão	174
Figura 8. 19 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo gerador de energia	174
Figura 8. 20 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo acumulador de energia.	175
Figura 8. 21 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo de válvulas de acionamento	175
Figura 8. 22 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo freio motor	176

Figura 8. 23 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo freio dianteiro	176
Figura 8. 24 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo de relação pneu-solo	177
Figura 8. 25 Gráfico da confiabilidade na escala de Weibull para o componente reduzido CRCG012	179
Figura 8. 26 Confiabilidade do CRCG012 (linha azul), CRCG009 (linha preta), CRCG004 (linha rosa) e CO09 (linha verde)	181
Figura 8. 27 Função densidade de probabilidade de falha (fdp) para os componentes reduzidos CRCG012 (linha azul), CRCG009 (linha preta), CRCG004 (linha rosa) e CO09 (linha verde)	181
Figura 8. 28 Função confiabilidade para os componentes reduzidos CRCG028 (linha azul), CRCG027 (linha preta), CRCG029 (linha rosa) e CRCG031 (linha verde) e CRCG025 (linha vermelha)	183
Figura 8. 29 Função densidade de probabilidade de falha (fdp) para os componentes reduzidos CRCG028 (linha azul), CRCG027 (linha preta), CRCG029 (linha rosa) e CRCG031 (linha verde) e CRCG025 (linha vermelha)	183

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 Dados de acidentes de trânsito da Polícia Rodoviária do Estado de São Paulo	10
Tabela 2. 2 Dados de acidentes de trânsito Departamento Nacional de Estradas de Rodagem -	11
Tabela 3. 1 Tela de relatório dos itens da amostra	44
Tabela 3. 2 Tela com os valores dos parâmetros da distribuição de Weibull	45
Tabela 3. 3 Estimativa de λ_o , α_o e número de falhas, dado $R(x)$ e β , para a distância percorrida de 100.000 km/ano	48
Tabela 4. 1 Valores de β_{ce} e λ_{ce} , R_{ce} , F_{ce} , tif_{ce} e fdp_{ce} para componente com sensor real	61
Tabela 4. 2 Valores de β_{ce} e λ_{ce} , R_{ce} , F_{ce} , tif_{ce} e fdp_{ce} para componente sem sensor	62
Tabela 4. 3 Dados de saída para o componente sem sensor, na escala linear	64
Tabela 4. 4 Dados de saída para o sensor, na escala linear	66
Tabela 4. 5 Dados de saída para o componente equivalente, na escala linear	66
Tabela 4. 6 Dados de saída na escala linear para componente equivalente com sensor perfeito	68
Tabela 5. 1 Relação dos itens do circuito de freio pneumático (figuras 5.2 e 5.3)	85
Tabela 5. 2 Itens do freio de sapatas	94
Tabela 7. 1 Relatório dos dados dos itens da amostra	117
Tabela 7. 2 Dados do componente equivalente na escala de Weibull	132
Tabela 7. 3 Dados do componente reduzido na escala linear	133
Tabela 8. 1 Relação de todos os componentes que são utilizados para construir um circuito de freio pneumático	138
Tabela 8. 2 Relação de todos os componentes que são utilizados para constituir o circuito de freio pneumático da figura 8.1 e 8.2	140

Tabela 8. 2 Relação de todos os componentes que são utilizados para constituir o circuito de freio pneumático da figura 8.1 e 8.2	140
Tabela 8. 3 Relação dos componentes que são utilizados para constituir o subsistema de “atuação” pneumática da figura 8.1	168
Tabela 8. 4 Relação dos componentes que são utilizados para constituir os subsistema de atuação mecânica	171
Tabela 8. 5 Relação dos componentes que são utilizados para constituir o subsistema de atuação elétrica	172
Tabela 8. 6 Funções confiabilísticas na escala de Weibull para o componente reduzido CRCG012	179
Tabela 8. 7 Funções confiabilísticas na escala linear para o componente reduzido CRCG028	184

Nomenclatura

Letras Gregas

α_o - parâmetro de escala ou vida característica

β - parâmetro de forma

β_{coi} - parâmetro de forma do i-ésimo componente CO_i

β_{sei} - parâmetro de forma do i-ésimo sensor SE_i

γ - parâmetro de localização ou vida inicial

λ_o - taxa de falha característica

λ_{coi} - taxa de falha instantânea do i-ésimo componente CO_i

λ_{sei} - taxa de falha instantânea do i-ésimo sensor SE_i

λ_{ocoi} - taxa de falha característica do i-ésimo componente CO_i

λ_{osei} - taxa de falha característica do i-ésimo sensor SE_i

Letras Latinas

F_{cei} - não-confiabilidade do i-ésimo componente equivalente CE_i

F_{coi} - não-confiabilidade do i-ésimo componente CO_i

F_{CRi} - não-confiabilidade do componente i-ésimo componente reduzido CR_i

F_{sei} - não-confiabilidade do i-ésimo sensor SE_i

f_{sei} - função densidade de probabilidade (fdp) do sensor SE_i

f_{coi} - função densidade de probabilidade (fdp) do componente CO_i

h - hora

km - unidade de comprimento

n - número de ciclos

- R_{coa} - Confiabilidade do componente (CO_A)
 R_{cob} - Confiabilidade do componente (CO_B)
 R_{coi} - confiabilidade do i-ésimo componente CO_i
 R_{cei} - Confiabilidade do i-ésimo componente equivalente (CE_i)
 R_{sci} - confiabilidade do i-ésimo sensor SE_i
 x - vida, definida na unidade de tempo (h), de distância percorrida (km) ou ciclos (n)

Abreviaturas

- CE - componente equivalente
 CG - circuito geral
 CO - componente
 CR - componentes reduzidos
 GAE - Grupo Acumulador de Energia
 GCA - Grupo de Controle e Alerta
 GEC - Grupo do Eixo da Carreta
 GED - Grupo do Eixo Dianteiro
 GET - Grupo do Eixo Traseiro
 GGE - Grupo Gerador de Energia
 GFA - Grupo de Freio Auxiliar
 GMC - Grupo Conexão Motor-Compressor
 GVA - Grupo de Válvulas de Acionamento
 MTBF - Mean Time Between Failure
 MTTF - Mean Time To Failure
 RPS - Relação Pneu-Solo
 SE - Subsistema de “atuação” Elétrica
 SH - Subsistema de “atuação” Hidráulica
 SM - Subsistema de “atuação” Mecânica
 SP - Subsistema de “atuação” Pneumática
 ST - Subsistema de “atuação” eletrônica
 TMAF - Tempo Médio Até Falha
 TMEF - Tempo Médio Entre Falha

Resumo

DIAS, A., *Metodologia para análise da confiabilidade em freios pneumáticos automotivos*.

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996.198p.
Tese (Doutorado)

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para análise da confiabilidade de freios pneumáticos automotivos com o objetivo de fornecer aos projetistas e analistas de sistemas de freios pneumáticos, ferramentas que facilitem a incorporação das variáveis confiabilísticas no projeto dos componentes, dos subsistemas e dos sistemas de freios, em tempo de projeto. Utilizou-se a distribuição probabilística de Weibull como a função representativa dos eventos de falha, calculando-se a confiabilidade, a não-confiabilidade, a taxa instantânea de falha e a função densidade de probabilidade de falha dos itens que compõem os circuitos de freio. O método de análise foi dividido em cinco etapas: modelo físico, identificação dos itens do sistema, modelo confiabilístico, modelo matemático e modelo computacional. No modelo computacional foi desenvolvido o programa BRAKEREL (Brake Reliability Program), programado no *Visual Basic for Windows*, para calcular a confiabilidade, a não confiabilidade, a taxa instantânea de falha e a função densidade de probabilidade de falha para todos os itens do sistema, apresentando os resultados na forma de gráfico e de tabelas.

Palavras chaves: confiabilidade, freios pneumáticos, metodologia

Abstract

DIAS, A., *Methodology for reliability analysis of automotive pneumatic brakes*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 198p. Tese (Doutorado)

This work presents a methodology for reliability analysis of automotive pneumatic brakes, with the objective of providing the designers and the brake systems analysts with some tools which can facilitate the incorporation of the reliability variables in the design of the components, the subsystems and the brake systems, in project's realtime. The Weibull distribution is used as a function representing the failure events, calculating the reliability, the unreliability, hazard rate and failure density function, of the components of the brake circuits. The analysis method is composed of five steps: physical model, systems identification, reliability model, mathematical model and computational model. In the computational model it was developed the BRAKEREL program (Brake Reliability Program) using the Visual Basic for Windows in calculating the reliability, the unreliability, hazard rate and the failure density function, for all the components of the system. The results are presented in grafical form and tables.

Key-words: reliability, pneumatic brakes, methodology.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aspectos gerais

As experiências adquiridas na área do ensino em Escola Técnica e Universidades, ministrando disciplinas de Resistência dos Materiais, Elementos de Máquinas e outras correlatas à área, juntamente com trabalhos de pesquisa desenvolvidos na área de Metodologia de Projeto Mecânico, despertaram o interesse e a necessidade de estudar confiabilidade. Concluiu-se que era importante sistematizar uma metodologia confiabilística para empregar no projeto de componentes e sistemas mecânicos.

Essa expectativa encontrou eco no Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), onde o Professor Dr. Carlos Amadeu Pallerosi coordenava uma linha de pesquisa voltada para aplicação da confiabilidade no projeto e na análise de sistemas de produção contínua. Interessado, também, pela problemática da segurança veicular, propôs um tema de tese que abordasse a confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade em freios pneumáticos automotivos.

As primeiras pesquisas indicaram que o tema era apropriado a um trabalho de tese em engenharia mecânica e de significativo alcance social e econômico, em função dos altos percentuais de acidentes de trânsito envolvendo caminhões e ônibus no Brasil. No nível internacional a discussão está mais consolidada e a tendência é priorizar os investimentos na melhoria técnica do sistema de transporte a fim de garantir maior segurança para o usuário e aumentar a confiabilidade do sistema[26, 42, 43].

Por outro lado, percebeu-se também que o ensino e a pesquisa em confiabilidade para a área de Engenharia Mecânica são pouco significativos no Brasil. Poucos são os Institutos de Pesquisa e Universidades que levam em consideração as variáveis confiabilísticas nos projetos que desenvolvem, e a maioria das Escolas de Engenharia não tem sequer em seus programas de ensino de graduação ou de pós-graduação os conceitos fundamentais de confiabilidade.

1.2 Aspectos específicos

A noção de confiabilidade é inerente ao Homem, independente da sua definição ou da sua formulação matemática. Essa capacidade de percepção ou sensibilidade ao risco tem levado a humanidade a gerar técnicas e procedimentos cada vez mais apropriados a produtos e serviços, objetivando suprir as expectativas do funcionamento seguro e confiável, durante o tempo de operação.

Nos dias atuais, fabricantes e consumidores de produtos dos setores aeroespaciais, nucleares, siderúrgicos, químicos, entre outros, acompanham, “par e passo”, muitos aspectos ligados à segurança e à confiabilidade. A indústria em geral está tomando conhecimento dessa problemática através das normas Nacionais e Internacionais sobre qualidade e através das exigências do consumidor.

Na área automotiva começa a intensificar-se o número de trabalhos que tratam da confiabilidade de sistemas, principalmente, os associados à eletrônica. A eletrônica é caracterizada pela grande maioria de itens não reparáveis. Nesse caso a confiabilidade é obtida a partir dos tempos até falha. Já os componentes e sistemas mecânicos são em grande parte reparáveis. Nesse caso, além do controle dos tempos até falha (TAF) é preciso também dispor dos tempos entre falhas (TEF). Por outro lado, para os itens não reparáveis o tempo de recolocação é, igualmente, uma variável importante. Esse tempo está intimamente vinculado ao tempo de manutenção. Através dessas variáveis pode-se fazer a análise global, qual seja: analisar a confiabilidade, a manutenibilidade e a disponibilidade dos itens reparáveis.

Essa análise global permite, segundo Pallerosi[71,72], determinar a **Qualidade Temporal** (vida) dos sistemas reparáveis. A metodologia proposta para a melhoria da qualidade temporal está sintetizada na Figura 1. 1 . Essa metodologia parte do princípio de que

a atuação sobre o projeto para melhorar a confiabilidade (+ C) e a manutenibilidade (+ M) resulta no aumento da disponibilidade (+ D), que é a expectativa maior do consumidor.

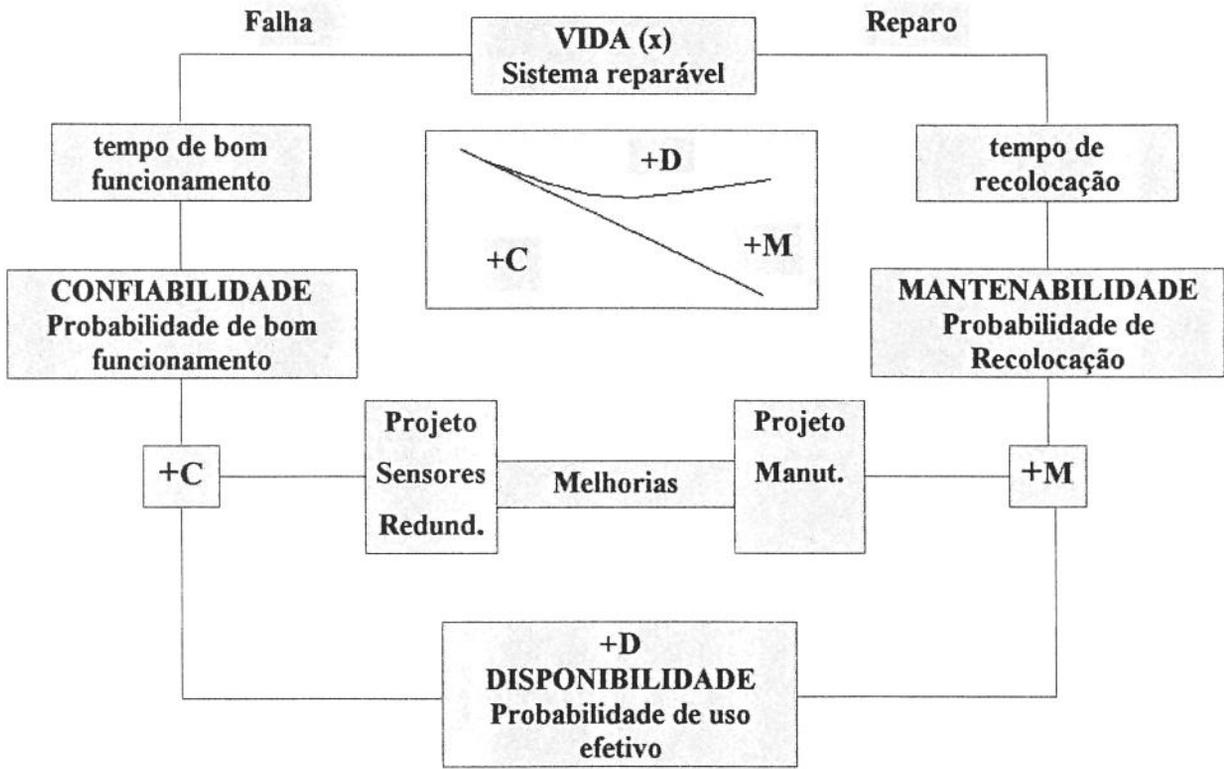


Figura 1. 1 - Correlações entre Confiabilidade (C), Manutenibilidade (M) e Disponibilidade (D) para produtos reparáveis. [71,72, 25]

1.3 Objetivos do trabalho

O objetivo inicial do trabalho era determinar a qualidade temporal dos freios pneumáticos automotivos. Era necessário, porém, adaptar algumas ferramentas de análise e desenvolver outras no sentido de obter a confiabilidade, a manutenibilidade e a disponibilidade dos freios pneumáticos. Como o problema proposto seria amplo demais para imprimir a profundidade que se desejava, concluiu-se que o trabalho se concentraria no desenvolvimento de uma *metodologia para a análise da confiabilidade em freios pneumáticos automotivos*. Para tanto, fez-se um primeiro levantamento bibliográfico, a fim de verificar o “estado da arte” sobre o tema proposto. Constatou-se que:

- não está disponível na literatura geral e nem na específica uma metodologia para determinar a confiabilidade em freios pneumáticos automotivos;

- os projetistas, fabricantes e montadoras de circuitos de freios pneumáticos, no Brasil, não dispõem de programas computacionais voltados para a determinação da confiabilidade de componentes, de subcircuitos e de circuitos de freios, já existentes ou em desenvolvimento;
- a falha no sistema de frenagem do veículo constitui-se na principal causa de acidentes com falha mecânica, quando se compara com os outros sistemas que fazem parte do sistema de segurança veicular;
- as variáveis relativas à confiabilidade e segurança farão parte dos principais requisitos na avaliação de produtos e serviços, para a sociedade do século XXI;
- no nível internacional está sendo proposta legislação, ainda mais rigorosa, sobre a responsabilidade civil de montadoras e fabricantes de peças do setor automotivo para as falhas catastróficas de itens que estiverem relacionados com a segurança veicular;
- a tomada de consciência, por parte dos projetistas e dos fabricantes de sistemas de segurança veicular, de que o item que não falha no tempo previsto, falhará no tempo futuro, está exigindo soluções preventivas complementares para aumentar a confiabilidade e segurança dos sistemas.

A partir dessas constatações sistematizou-se o trabalho para atingir as seguintes proposições:

- estruturar uma metodologia para análise da confiabilidade de freios pneumáticos automotivos: para o sistema geral, para subsistemas e para cada componente, a fim de permitir a avaliação confiabilística dos freios;
- desenvolver ferramentas computacionais voltadas para a aplicação da confiabilidade em freios pneumáticos automotivos com o objetivo de identificar, em tempo de projeto, os itens críticos do sistema;
- gerar funções que representem os itens que constituem o circuito de freio pneumático automotivo e explicitar os cálculos na forma de gráfico e de tabelas, para todas as saídas da distribuição probabilística de Weibull.

Para atingir esses objetivos, decidiu-se :

- trabalhar com a teoria da confiabilidade baseada nas probabilidades condicionais;
- utilizar a distribuição probabilística de Weibull para representar os eventos de falha;

- obter a validação das equações desenvolvidas para a obtenção da confiabilidade de componentes equivalentes e da confiabilidade dos sistemas redundantes ativos e passivos, em relação às formulações teóricas;
- fazer um programa computacional que possa ser usado em plataformas do tipo “PC” e no ambiente “*windows*”;
- programar utilizando os conceitos da programação estruturada, orientada a eventos, visando as atualizações e complementações futuras; programar para permitir acessar bancos de dados de falhas, obtidos em laboratório ou em uso, programar para gerar a função densidade de probabilidade de falha, fdp, para cada componente, cada sistema de “atuação” e para cada grupo de “função” dos sistemas de freio pneumático automotivo; e finalmente, programar para gerar saídas na forma de gráfico e de tabelas para as funções confiabilidade, não-confiabilidade, taxa instantânea de falha e densidade de probabilidade de falha, para cada componente, sensor, subsistemas e para o sistema geral de freio pneumático.

1.4 Conteúdo dos capítulos

A organização dos conteúdos nos capítulos foi feita de maneira a dar ao leitor todas as variáveis fundamentais para o entendimento da metodologia desenvolvida para analisar a confiabilidade de freios pneumáticos automotivos. Cada capítulo é estruturado como se fosse um assunto específico.

Três áreas de conhecimento estão sendo apresentadas: confiabilidade, freios pneumáticos e programação computacional. O programa computacional vai tornar-se a interface entre o analista de sistemas de freios automotivos e as variáveis de entrada e saída relativas à confiabilidade.

No capítulo 2 descreve-se sobre a importância do tema proposto do ponto de vista social, técnico e econômico. É discutida a problemática do tráfego rodoviário e da segurança veicular, pontuando os principais aspectos que têm alçado o Brasil à posição de destaque, relativamente, ao número de acidentes rodoviários. Apresentam-se pesquisas e publicações sobre as condições de manutenção da frota de veículos de São Paulo e o número de acidentes

nas estradas de São Paulo e do Brasil. São apresentados, também, os índices internacionais que indicam o freio como o principal responsável por acidentes originados por falhas mecânicas.

Nos capítulos 3 e 4 é apresentado e desenvolvido o equacionamento matemático para a determinação da confiabilidade.

Além disso, no capítulo 3, é proposta uma uniformização da terminologia para as funções utilizadas para expressar a qualidade temporal dos sistemas reparáveis. É analisada a influência dos parâmetros da função probabilística de Weibull sobre o componente para a confiabilidade, a não-confiabilidade, a taxa instantânea de falha e a função densidade de probabilidade de falha. Faz-se também a determinação dos parâmetros da equação de Weibull a partir de bancos de dados de períodos até falha ou suspensão, utilizando o método da categoria mediana. Mostra-se, ainda, como se determinam esses parâmetros quando o valor da confiabilidade foi previamente definido.

No capítulo 4 é definido o equacionamento matemático para as funções relativas ao componente equivalente e ao componente reduzido. Determina-se a influência do sensor sobre o componente equivalente e faz-se a descrição da composição dos componentes reduzidos em arranjos série, paralelos ativo e passivo. Obtem-se os parâmetros da equação probabilística de Weibull para cada componente equivalente e componente reduzido. Constrói-se um exemplo demonstrativo do ganho da confiabilidade quando se incorpora, adequadamente, no sistema, tecnologia, sensor e redundância.

O capítulo 5 trata especificamente do circuito de freio pneumático. Faz-se um detalhamento do sistema de freio pneumático para ônibus e para caminhões com ou sem reboque e semi-reboque. Descreve-se o funcionamento do circuito e dos subcircuítos existentes. Além disso, apresentam-se as normas técnicas brasileiras e as principais normas internacionais, definindo a partir delas as condições de funcionamento normal de serviço de todos os subsistemas existentes.

No capítulo 6 é desenvolvida a metodologia. São discutidos os 5 passos da metodologia que está sendo proposta: modelo físico, identificação dos itens do sistema, modelo confiabilístico, modelo matemático e modelo computacional.

O capítulo 7 contém o programa computacional desenvolvido para aplicar a metodologia proposta. É chamado de BRAKEREL (*Brake Reliability Program*) e foi programado em *Visual Basic for Windows* versão 3.0. O programa admite criar todos os bancos de dados necessários para a análise da confiabilidade de freios pneumáticos automotivos. A qualquer

instante os dados cadastrados podem ser analisados, obtendo-se todas as funções probabilísticas da distribuição de Weibull, na forma de gráfico ou de tabela para cada item ou subdivisão do circuito de freio.

No capítulo 8 é feita a aplicação da metodologia proposta através de um estudo de caso. É selecionado um circuito de freio básico e sobre ele é aplicada a metodologia proposta. Constrói-se o modelo confiabilístico fazendo as reduções sucessivas, transformando o circuito num único componente reduzido. Utilizando o programa computacional obtêm-se os parâmetros da equação de Weibull para cada componente reduzido. Apresentam-se também os gráficos e tabelas com a confiabilidade, a não-confiabilidade, a taxa instantânea de falha e a função densidade de falha para cada componente existente, reduzido ou não.

No capítulo 9 faz-se a análise dos resultados e explicitam-se as conclusões.

No capítulo 10 estão as sugestões para próximos trabalhos.

Finalmente, tem-se as referências bibliográficas.

Capítulo 2

Sistema de segurança veicular

2.1 Aspectos Gerais

O desenvolvimento da indústria automotiva no mundo tem contribuído para as significativas transformações do nosso século. No Brasil os contrastes gerados pelo desenvolvimento da indústria automotiva fazem parte do nosso cotidiano. Existe uma convivência, razoavelmente ameaçadora, entre veículos modernos, velozes e potentes, e rodovias e cidades, cujo traçado viário tem se mostrado inadequado para as exigências da “modernidade”. Esse contexto é resultante do modelo de desenvolvimento, no qual se priorizou o transporte rodoviário sem ter-se investido na infra-estrutura necessária.

É preciso considerar, ainda, que a diminuição do tempo de projeto e de fabricação de novos produtos ampliou sobremaneira a capacidade produtiva da indústria nacional, hoje estimada em 1.500.000 veículos anuais. Vale lembrar que a integração comercial das nações do Cone Sul, da América do Sul, está também contribuindo para o aumento do fluxo de veículos. Assim:

- a cada dia mais caminhões trafegam nas vias já congestionadas transportando a produção gerada pelo setor industrial e agrícola;
- intensifica-se o fluxo dos ônibus urbanos, interurbanos e interestaduais, hoje indispensáveis à sociedade moderna, fortemente dependente da integração entre os centros produtivos;
- devido à alta produção os automóveis e as caminhonetes estão mais fáceis de serem adquiridos;

- a integração entre os mercados urbanos e as fronteiras agrícolas, paralelamente à integração comercial do Cone Sul, faz com que se percorram distâncias cada vez maiores, em tempos que se deseja cada vez menores.

Por outro lado a tecnologia tem permitido produzir veículos:

- cada vez mais potentes e velozes;
- com melhor aerodinâmica;
- com menor nível de ruído;
- com maior conforto.

Essas variáveis exercem verdadeiro fascínio sobre o consumidor. Proporcionam ao condutor do veículo, mesmo os bem-informados, um razoável distanciamento das relações físicas, inerentes ao nosso Planeta, como o atrito, pressão atmosférica, peso, estabilidade dinâmica, desgaste das peças e probabilidade de falha.

A conjunção de todos estes fatores, somados à:

- ineficiência da legislação de trânsito;
- falta de educação dos motoristas;
- falta de cultura de manutenção;
- execução de projetos deslocados de análise mantenedora;
- desconsideração das variáveis confiabilísticas;

gera esse quadro caótico que fere, que dilacera, que mata.

2.2 Acidentes de trânsito e manutenção automotiva no Brasil

O conjunto de variáveis comentado anteriormente, de uma forma ou de outra tem proporcionado o aumento do número de acidentes de trânsito em todo o mundo. O Brasil, identificado na mídia como campeão mundial em acidentes de trânsito, apresenta índices que, embora dispersos, merecem particular atenção. Carvalho [23] publicou que a taxa de acidentes por 10.000 veículos excede em 5 vezes a dos Estados Unidos da América e em 10 vezes a da

Europa. Diz ainda que a maioria das vítimas tem idade inferior a 33 anos. Essa informação pode ser confirmada no relatório de Informações sobre Acidentes/Feridos/Mortos e Multas do Departamento da Polícia Rodoviária Federal do Ministério da Justiça [77]. Giraldes e Taketani [41] apresentaram trabalho, em 1988, onde se constata que caminhões e ônibus estiveram envolvidos em aproximadamente 50% dos acidentes de trânsito pesquisados. A Polícia Rodoviária do Estado de São Paulo publicou informações mais recentes sobre acidentes de trânsito, ocorridos somente nas estradas estaduais paulistas, os quais estão resumidos na Tabela 2. 1 [67]. Na Tabela 2. 2 estão os dados do Departamento da Polícia Rodoviária Federal (DPRF) sobre acidentes de trânsito ocorridos somente nas estradas federais brasileiras[77]. Na última coluna das tabelas 2.1 e 2.2 estão calculados os percentuais de veículos envolvidos em acidentes no ano de 1995, por categoria. No Estado de São Paulo, ônibus e caminhões se envolveram em 27,1% dos acidentes, enquanto que nas estradas federais o percentual de ônibus, caminhões e caminhonetes foi de 42,8%. Os percentuais ganham significância ao se considerar que a frota de caminhões e ônibus gira em torno de 10% da frota nacional de veículos. Nota-se ainda que a tendência do número de acidentes é de crescimento.

Tabela 2. 1 Dados de acidentes de trânsito da Polícia Rodoviária do Estado de São Paulo [67]

ACIDENTES DE TRÂNSITO - POLÍCIA ROD. DO ESTADO DE SÃO PAULO				
	1993	1994	1995	% (1995)
Automóvel	37.507	44.716	54.521	65,5%
Caminhão	15.285	15.843	19.537	23,5 %
Ônibus	2.328	2.677	3.024	3,6%
Outros	4.225	4.733	6.153	7,4%
TOTAL	59.345	76.969	83.235	100

As condições relativas à manutenção dos veículos também merecem destaque. O Instituto Nacional de Segurança no Trânsito (INST)[52] divulgou relatório de pesquisa sobre “Inspeção de segurança veicular em veículos leves da frota da grande São Paulo” em 1993, no qual se constata que 72% dos veículos avaliados apresentavam problemas de falta de manutenção, em pelo menos um dos três itens de freios inspecionados: óleo de freio, discos de freio dianteiro e pastilhas. Em outra pesquisa, também feita pelo INST[51], em 1993, agora

sobre “as condições de manutenção de veículos de carga da frota de São Paulo”, são revelados dados ainda mais preocupantes. Verificou-se que 97,5% dos caminhões apresentavam pelo menos um problema no sistema de freio, e 60% dos veículos pesquisados haviam removido o freio de estacionamento. Os pesquisadores alertam que nenhum caminhão deixou de apresentar qualquer defeito, e cerca de 90% apresentaram defeitos de natureza média ou grave.

Tabela 2. 2 Dados de acidentes de trânsito do Departamento de Polícia Rodoviária Federal [77]

ACIDENTES DE TRÂNSITO - DNER				
	1993	1994	1995	% (1995)
Automóvel	53.186	60.976	79.571	49,8%
Caminhonete e comercial leve	8.350	10.224	12.216	7,6
Caminhão	37.596	42.053	48.688	30,5
Ônibus	5.423	6.086	7.446	4,7
Outros	6.642	9.165	11.972	7,5
TOTAL	111.197	128.508	159.893	100

Deve-se considerar que a pesquisa relativa aos automóveis foi feita em cinco “*Shopping Center*” da cidade de São Paulo. A quantidade de veículos avaliada é considerada representativa da população. Os pesquisadores fazem a ressalva de que a idade média dos veículos pesquisados é de 7,8 anos, enquanto que a da cidade de São Paulo é de 11 anos, que por sua vez, é um pouco menor do que a idade média dos automóveis brasileiros. Já a idade média da frota de veículos pesados foi de 11 anos, sendo que 50% deles tinham idade inferior a 10 anos. De uma forma ou de outra, as pesquisas retratam a imagem da frota nacional de veículos automotores.

Em alguns países, principalmente os da Europa, existe uma legislação específica sobre inspeção veicular, que obriga os proprietários a fazerem vistorias, anuais ou bianuais, dependendo do uso e da vida do veículo.

No Brasil foi publicado no Diário Oficial da União, em 22/12/1995, a Resolução do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) [28] que dispõe sobre a vistoria e a inspeção de veículos. O artigo 5º institui a inspeção de segurança veicular contemplando diversos aspectos, entre eles o sistema de freios, de direção, de suspensão, de rodas e pneus. O parágrafo 1º desse

artigo determina que a obrigatoriedade da inspeção deverá iniciar em janeiro de 1998, estabelecendo todo o cronograma de implantação.

2.3 Perspectiva internacional sobre a falha catastrófica

No nível internacional há informações mais precisas acerca de falhas catastróficas em componentes dos sistemas responsáveis pela segurança veicular. O “*European Council Directive*” [22], já em 1985, propunha aos fabricantes de veículos automotores das nações da Comunidade Econômica Européia (C.E.E.) um referencial de confiabilidade, relativo à falha catastrófica, para todos os sistemas que estão intimamente ligados com a segurança do veículo (Figura 2. 1). Foi proposta uma confiabilidade mínima de 99,99% para a vida útil de 10 anos, com nível de confiança (NC) de 95% a 99%. Como o freio é um subsistema do sistema geral de segurança veicular, a sua confiabilidade deve, então, ser maior que 99,99%, ou seja, A confiabilidade do freio em 10 anos ($R(10)$) deve permanecer maior do que 0,9999 ($R(10) > 0,9999$). Essa proposta adquire significância quando se comparam as perspectivas relacionadas com a confiabilidade dos subsistemas de segurança veicular (Figura 2. 1) , com as pesquisas sobre acidentes originados por falhas catastróficas, nos mesmos subsistemas (Figura 2. 2).

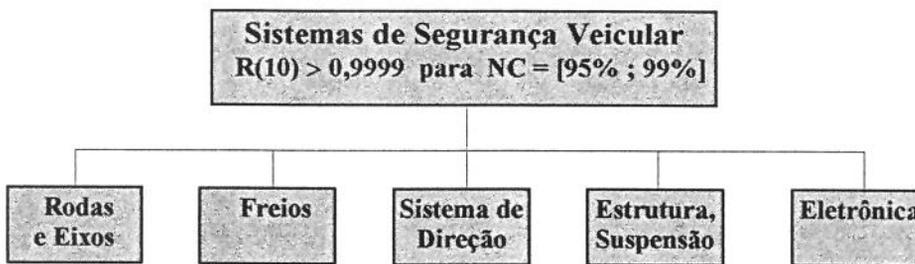


Figura 2. 1 Confiabilidade recomendada para sistemas relacionados com segurança veicular [22].

Vê-se, por exemplo, na pesquisa feita pelo “DEKRA” na República Federal da Alemanha, entre 1977 e 1988, sobre acidentes de trânsito originados por falhas mecânicas [43], que essa preocupação não é sem sentido. A Figura 2. 2 mostra a frequência relativa de falhas mecânicas de cada um dos subsistemas, relacionados com a segurança do veículo. Observa-se que os freios falharam em 66% dos acidentes com caminhões e mais de 50% nos acidentes com automóveis e reboques. Os pneus, por sua vez, foram responsáveis por 35% dos acidentes dos automóveis, 21% dos acidentes dos reboques e 16% dos acidentes com

caminhões. É sabido que freios e pneus são a base do sistema de parada de um veículo. No entanto, pela Figura 2. 2, constata-se que eles foram responsáveis por 87% dos acidentes com falhas mecânicas de automóveis e 82% dos acidentes com caminhões.

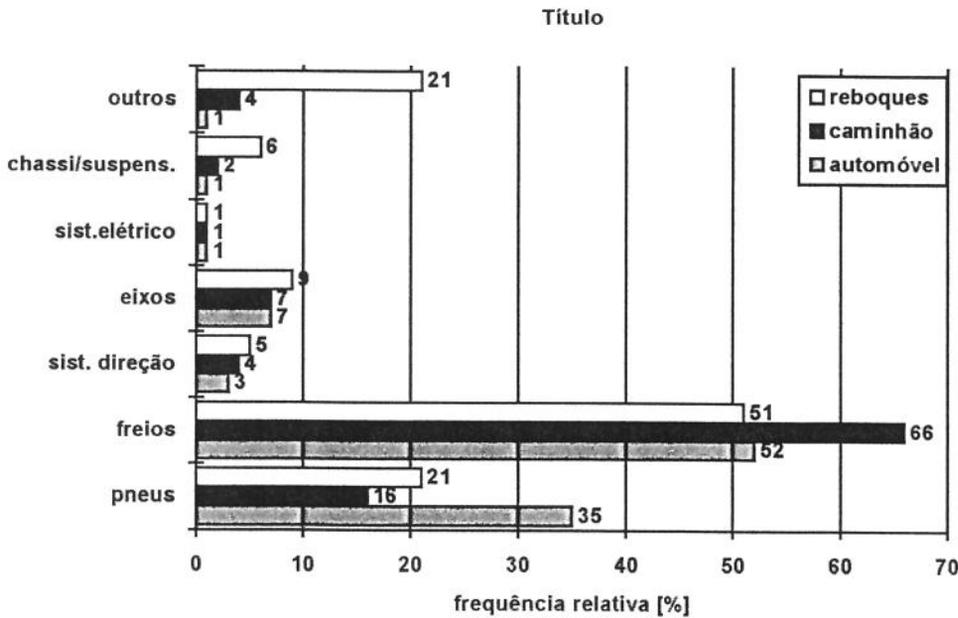


Figura 2. 2 Percentual de acidentes causados por defeitos técnicos de sistemas relacionados com a segurança veicular [43]

Evidentemente, para a obtenção do requisito de confiabilidade de 99,99% para a vida útil de 10 anos, é requerido de cada um dos sistemas que estão relacionados com a segurança do veículo um nível de confiabilidade maior que o acima apresentado. Analisando a Figura 2. 2, constata-se que os atuais sistemas de freio estão relativamente mais propensos a falhas catastróficas quando comparados estatisticamente aos outros sistemas, igualmente críticos, do ponto de vista da segurança veicular. Pelo visto será necessário forte investimento em pesquisa e desenvolvimento para que os freios e pneus atinjam, pelo menos, os patamares de falha catastrófica dos outros subsistemas avaliados na Figura 2. 2.

2.4 Confiabilidade e segurança

Confiabilidade é freqüentemente confundida com segurança. Mas, ao analisar as definições de segurança e confiabilidade, percebe-se que elas expressam conceitos distintos, embora a relação entre elas nem sempre seja simples.

Do ponto de vista da confiabilidade, a falha de um dos itens do sistema de freio repercute no não cumprimento das funções que deveriam ser desempenhadas num espaço de tempo previamente determinado. Do ponto de vista da segurança a falha do item pode provocar um acidente.

A segurança está associada ao ato ou efeito de segurar[18]. Em engenharia, a segurança de projeto é tradicionalmente expressa na forma de um fator de segurança. É definida como um número pelo qual a resistência limite do material é dividida, a fim de obter a resistência de trabalho ou a resistência de projeto[79]. É um número que tem o objetivo de “compensar” uma série de variáveis associadas ao acabamento superficial, ao tamanho, à temperatura, à forma, à concentrações de tensão e aos efeitos diversos[85]. Todas essas variáveis são assumidas, na maioria das vezes, como determinísticas. Os projetos mais realísticos, no entanto, levam em consideração que os carregamentos e as resistências são variáveis randômicas, distribuídas em torno de suas respectivas médias.

Mesmo com o fator de segurança, os itens falham. Além disso, as falhas não podem ser tratadas igualmente, havendo larga gama de conseqüências, dependendo do modo da falha. Algumas vezes, a falha de um item se reflete tão somente nos aspectos econômicos. Outras vezes, pode provocar danos individuais ou coletivos, ou afetar, de forma diversa, a saúde das pessoas. Nesses casos, o projetista tem de se preocupar com o projeto para funcionar e com o projeto para falhar, procurando direcionar para o modo da falha que é mais conveniente. Nesse ponto, a confiabilidade poderia ser vista do ponto de vista do funcionamento do projeto, ou do ponto de vista do modo de falha. Se a falha for paramétrica, ou seja, se a falha vai acontecendo aos poucos em função do tempo de funcionamento, a sua influência sobre a confiabilidade pode ser diminuída através da utilização de sensores. Se a falha for do tipo catastrófica, ou seja, ocorre repentinamente, sem aviso prévio, recomenda-se usar arranjos redundantes para diminuir os seus efeitos da falha sobre o sistema como um todo.

A confiabilidade, porém, não está diretamente vinculada ao estudo da prevenção ou à diminuição dos riscos com acidentes. A confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função especificada, sob condições e intervalos de tempo pré-determinados[5]. Pela definição, vê-se que a confiabilidade requer o funcionamento correto do item. Requer também que a tarefa seja cumprida no tempo e nas condições previamente definidas.

Lewis [56] demonstra que, às vezes, os conceitos de confiabilidade e segurança são conflitantes. Cita o exemplo de dispositivo de proteção, que do ponto de vista da segurança,

devem ser projetados e ao mesmo tempo, deve ser estabelecidos os procedimentos de operação, para orientar os tomadores de decisão no sentido de procederem a parada do equipamento ou da planta industrial, a qualquer manifestação de insegurança, a fim de garantir o mínimo risco de acidentes aos usuários. Do ponto de vista da confiabilidade, o ideal seria administrar o equipamento ou a planta industrial operando até que o sinal de falha fosse efetivamente confirmado. Melhor seria se o reparo fosse feito com o item em operação, sem tempo de parada.

Na indústria química, nas plantas nucleares, nos dispositivos aeroespaciais, na aviação e também nos sistemas de segurança veicular, a relação entre segurança e confiabilidade é complexa, mas o interesse de evitar a falha é comum. Se não houver falha do item, não há perda na produção e ao mesmo tempo não há riscos que possam ser causados aos usuários.

Para o freio pneumático, a confiabilidade está associada à frequência de vezes que está disponível para desempenhar a função requerida em relação às vezes que é solicitado. O aumento da confiabilidade é proporcionado através do aumento da qualidade das peças, da colocação de sensores para detectar a condição iminente de falha e pela adição de redundâncias ativas ou passivas. Evidentemente, todas essas soluções têm reflexos em custos do produto e precisam ser devidamente equacionadas. Nos capítulos posteriores, será possível visualizar o quanto cada uma dessas decisões contribui para o aumento da confiabilidade.

Já a segurança do sistema de freio pneumático é garantida pela relação entre a resistência mecânica das peças e as cargas admissíveis de trabalho. Como a segurança do veículo está diretamente associada à segurança do freio, o ideal seria projetá-lo de forma que impedisse o deslocamento do veículo antes que alguma falha pudesse ocorrer. Pode-se dizer, então, que o sistema de freio teria elevado grau de segurança. Já a confiabilidade pode tornar-se discutível.

A segurança está vinculada à garantia da não ocorrência de acidentes. Normalmente essas garantias, nos produtos de engenharia, estão vinculadas à melhoria da qualidade no projeto e na fabricação, ao aumento da resistência, à atenção com a manutenção e ao treinamento dos usuários.

A análise da confiabilidade pode ser feita para o sistema de freio pneumático ou para o sistema de segurança do freio. Nesse caso, deve-se fazer distinção entre as taxas de falhas (λ) que vão interferir no funcionamento do sistema de freio e as taxas de falhas (λ^*) que vão interferir nos aspectos associados à segurança do freio. Uma análise desse tipo orienta, por

exemplo, a gerência do processo, definindo padrões específicos para as intervenções de manutenção[90].

2.5 Confiabilidade e manutenção

A proposta do European Council Directive da ECE [22] de exigir níveis de confiabilidade de 99,99% para 10 anos de vida do veículo, em relação a falha catastrófica, parece contraditória se vista da ótica do mundo moderno, onde a renovação de produtos ocorre velozmente. Por outro lado, as pesquisas no Brasil indicam que a vida média da frota nacional é superior a 10 anos. Então, o problema é: como garantir que o veículo usado e o novo tenham os mesmos níveis de confiabilidade? Pela figura 1.1, vê-se que é no projeto que se pode contribuir para a melhoria da confiabilidade e da manutenibilidade. É nessa fase que se podem viabilizar modificações sobre os produtos reparáveis de maneira que venham a permanecer “tão bons como os novos” por toda a vida útil. Para a indústria automotiva, novos paradigmas para detecção de falhas e para a manutenibilidade ainda precisam ser formulados, para que possa acontecer na prática.

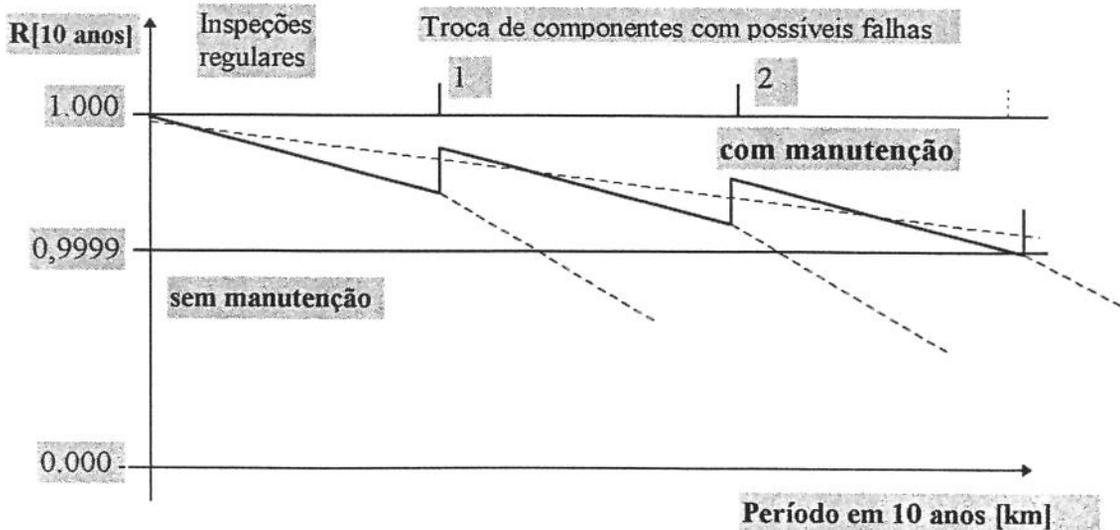


Figura 2. 3 Planejamento da manutenção em função da confiabilidade para um período de 10 anos[75].

A utilização de variáveis estocásticas em vez das determinísticas, associadas à adoção das trocas programadas, como está representado na Figura 2. 3, é uma possibilidade a ser considerada. Nesse caso a manutenção será executada em função da confiabilidade requerida para cada subsistema do veículo. É evidente que quanto maior for o conhecimento

sobre o produto e mais rigoroso for o controle do processo de fabricação, mais precisos serão os períodos de manutenção. De outro lado, a utilização de sensores para monitorar as condições de uso, desgaste, pressão, temperatura, etc., vão auxiliar a predição das falhas, permitindo antecipar-se a elas.

Evidentemente, as intervenções de manutenção devem ser feitas mediante garantia da qualidade das peças de reposição e por mão de obra qualificada, a fim de manter o sistema reparado tão bom quanto um novo (“*good-as-new*”). Tanto Billinton[20] quanto Lewis[56] afirmam: na manutenção os fatores humanos desempenham papel fundamental para garantir os níveis de confiabilidade dos produtos reparáveis. Reys[80] contextualiza muito bem essas variáveis, construindo critérios que auxiliam na escolha de metodologias de manutenção e utilizando a confiabilidade como um eixo de referência. Afirma ainda que a associação do conceito de confiabilidade ao de manutenção requer a implementação de procedimentos normatizados de aquisição e arquivos de dados relacionados à atividade de manutenção.

2.6 Soluções alternativas

A preocupação com acidentes de trânsito no Brasil tem forçado os governos e a sociedade a introduzirem soluções que, às vezes, se contrapõem ao desenvolvimento que desejam. Tem-se como exemplo as lombadas e valetas. Uma outra alternativa que está sendo muito adotada é a colocação de radares nas rodovias. Essas soluções agem sobre o condutor do veículo. Certamente, diminuem a velocidade média do tráfego, mas não contribuem para o aperfeiçoamento da malha viária e dos veículos como um todo.

No âmbito internacional, muitos países, também preocupados com a segurança veicular, estão adotando legislação que exige a colocação de limitadores de velocidade em veículos rodoviários de carga e de passageiros. Catini[26] cita a norma EWG de 92/6, da Comunidade Econômica Européia (C.E.E.), que exige a utilização de dispositivos que limitam em 85 km/h a velocidade de caminhões acima de 12 toneladas e em 100 km/h a velocidade de ônibus acima de 10 toneladas. Esses dispositivos, chamados de limitadores de velocidades, devem interferir na velocidade sem afetar o torque, a potência e a rotação do motor do veículo. Em algumas rodovias desses países, a velocidade é livre. Para trafegar nelas o veículo precisa, no entanto, estar equipado com sistemas de freios auxiliares, redundantes, como por exemplo, “*retarder*”.

Esses, se devidamente projetados e associados aos freios de emergência, podem se constituir em redundâncias passivas aos freios de serviço.

Tal restrição se justifica porque a elevada potência dos motores diesel, projetados para transpor aclives íngremes, tem condições de desenvolver, em trechos planos, velocidades para as quais componentes, como pneus e freios, não foram projetados[26].

2.7 Comentário

O aumento da quantidade de veículos no Brasil e no mundo tem contribuído fortemente para o grande número de acidentes de trânsito. No Brasil, esses números são altamente preocupantes e as estatísticas demonstram que o número de acidentes vem crescendo ano a ano. Avaliações internacionais apontam que os freios foram responsáveis por mais de 50% dos acidentes originados por falhas mecânicas em automóveis e por 66% em caminhões.

A manutenção dos sistemas que estão intimamente relacionados com a segurança veicular, da frota de veículos que trafegam no Brasil, segundo pesquisas divulgadas pelo Instituto Nacional de Segurança Veicular (INST), é basicamente corretiva. Verificou-se que 97,5% dos caminhões e 72% dos automóveis apresentavam algum tipo de problema de manutenção no sistema de freio. Pelos resultados, a manutenção só é feita quando o veículo está totalmente sem freio.

Esses problemas indicam que é preciso esclarecer os conceitos de manutenção, segurança e confiabilidade, discutindo novos paradigmas que possibilitem alcançar níveis de confiabilidade de 99,99% para os itens relacionados com a segurança veicular numa vida estimada de 10 anos. Constitui-se num campo de pesquisa muito importante para os dias atuais e ainda pouco explorado na academia.

Capítulo 3

Confiabilidade do componente

3.1 Aspectos Gerais

O estudo da confiabilidade em engenharia mecânica é frequentemente afetado pela escassez de informações relativas a valores de uso ou experimentais das taxas de falhas. Devido, principalmente, a problemas econômicos e metodológicos são poucos os itens que são testados até a falha. Lewis[56] sugere que os engenheiros e técnicos deveriam procurar alternativas diversas para suprirem essa escassez de dados. Sugere que sejam aproveitados os dados referentes às falhas que efetivamente ocorreram, os dados de ensaios suspensos ou censurados, assim como as estimativas genéricas contidas na literatura ou manuais. Todas essas informações, metodologicamente processadas por adequados métodos estatísticos e probabilísticos, certamente contribuirão para a análise da confiabilidade dos componentes, subsistemas e sistemas mecânicos.

Na prática é sabido que se um item (componente, subsistema ou sistema) não tiver falhado dentro do período previsto, com certeza falhará num instante futuro. Esse fato foi determinante para que os projetistas da área aeroespacial impusessem vários mecanismos de controle sobre o projeto, fabricação e uso dos equipamentos do setor. Por exemplo, passaram a registrar todas as falhas ocorridas e a analisar as causas mais prováveis dos danos, a fim de gerar informações para subsidiar os novos projetos e os planos de manutenção preventiva e preditiva das naves e aeronaves. Foi assim definido um referencial de confiabilidade para o setor.

No segmento automotivo esses procedimentos estão restritos, basicamente, a duas situações: nas principais competições automobilísticas (fórmula 1 e fórmula Indy)[56] e no do período de garantia. Neste segundo caso, porém, os dados de falhas ficam mais restritos às análises estatísticas e de custos. Por razões metodológicas, “desconhecimento” ou falta de ferramentas computacionais, a esses dados não é incorporada a análise confiabilística, como se faz no setor aeroespacial.

3.2 Terminologia relativa à confiabilidade

Neste trabalho priorizou-se o uso da terminologia já definida nas Normas Brasileiras NBR5462/81[5]. Mas nem toda a terminologia relativa à confiabilidade está normatizada. O desenvolvimento da indústria no mundo, de forma geral, e no Brasil em particular, tem contribuído para a rápida incorporação de técnicas modernas de projeto que fornecem um melhor controle do processo e da prevenção das falhas. Essas técnicas, em confronto com as teorias clássicas de projeto, indicam que muitas das variáveis de projeto são mais apropriadas ao tratamento estocástico do que ao determinístico. Devido a esse fato, muitas denominações e novos termos técnicos passam a fazer parte do vocabulário técnico de engenharia, na maioria das vezes traduzidos de outros idiomas. Essas traduções ou simples adaptações para a língua portuguesa, sem uma normatização prévia, têm causado a dispersão ou a duplicação de sentido a termos que têm o mesmo significado. Diante disso, propõe-se discutir a terminologia utilizada e apresentar propostas para a definição de termos que ainda não foram normatizados.

Os termos componente, subcircuitos ou circuito geral, sempre que for conveniente, serão chamados, simplesmente, de item. Item é entendido como “o termo geral que designa qualquer parte, subsistema, sistema ou equipamento que possa ser considerado individualmente e ensaiado separadamente”[5].

Viu-se no capítulo 1 que a análise da qualidade temporal envolve três variáveis: confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. Várias são as definições existentes mas, praticamente, todas convergem para o que a NBR 5462[5] estabelece. A função confiabilidade $R(x)$ será definida no capítulo 3.3.

A função manutenibilidade $M(x)$ (*maintainability*) é definida como:

- “capacidade de um item em ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante os procedimentos e meios prescritos”[5];
- “probabilidade de recolocar em serviço o elemento (componente, equipamento, sistema, etc.) em um dado tempo (t), ou seja, do elemento retornar ao estado de bom funcionamento (em operação)”[24].
- é a probabilidade de restabelecer as condições necessárias para o bom funcionamento de um sistema, dentro de um certo período previamente estabelecido.

A função disponibilidade $D(x)$ (*availability*) é definida como:

- “qualidade ou estado do que é disponível”[18];
- “capacidade de um item estar em condições de executar certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.”[5];
- “é a probabilidade de bom funcionamento de um dispositivo no instante t” [63];
- “é a relação entre o tempo de bom funcionamento do sistema e o tempo total esperado de utilização”[71].

Monchy[63] utiliza o termo manutenibilidade para a mesma definição. Os que adotam essa terminologia querem enfatizar o ato de fazer manutenção. Manutenção “é a ação de segurar com a mão, ato ou efeito de manter-se”[18]. Manter vem do latim *manutenere* e representa o ato de fazer manutenção. Conclui-se daí que o termo manutenibilidade é mais simples e é etimologicamente apropriado.

A dispersão da terminologia é maior, na definição dos eventos complementares. Para a função confiabilidade $R(x)$, a função complementar é $F(x)$, tal que, $F(x) = 1 - R(x)$. Para manutenibilidade $M(x)$, a função complementar é $N(x)$, sendo $N(x) = 1 - M(x)$, e para a disponibilidade $D(x)$ tem-se $I(x)$ como a função complementar, onde $I(x) = 1 - D(x)$.

A função $F(x)$ é denominada na Norma NBR 6742/87[7] como a probabilidade de falha ou a probabilidade acumulada de falha. Pallerosi[71] considera ser mais adequado expressar a

função $F(x)$ por desconfiabilidade. Para o complemento da função manutenibilidade, Pallerosi utiliza o termo Não-mantenabilidade e para o complemento da disponibilidade o termo indisponibilidade.

Confiabilidade é traduzido do inglês *reliability*, cujo antônimo é *unreliability* que é igual a *not reliability*, que, por sua vez, significa o “estado daquele em que não se pode confiar”. Disponibilidade é traduzido de *availability*, cujo antônimo é *unavailability* que é igual a *not availability*, cujo significado é “indisponível, inacessível” [70,48].

Na expectativa de contribuir para a uniformização da terminologia em questão, buscou-se informações em gramáticas (que prescrevem as normas da língua) e em lingüistas que têm estudado o processo de criação de novas palavras.

Alves[4] observa que o processo neológico, isto é, de criação de palavras, “é mais abundante nas línguas técnicas do que na língua geral” visto que “os conceitos técnicos e os científicos não cessam de serem criados e têm necessidade de serem nomeados”.

Os prefixos des-, in- e não- são os mais utilizados na formação de palavras que expressam negação. Dentre esses prefixos, Alves[4] considera o não- como o mais fecundo para a criação de novas palavras.

Segundo a autora o des- “prefixa-se as bases de natureza substantival, adjetival e verbal e manifesta, sobretudo, o valor da ‘ação contrária’ à base a que se associa”[4]. Para Cunha [29] o prefixo des- tem o sentido de separação, ação contrária. Para Almeida[2] o des- tem o sentido de separação, afastamento, negação. O prefixo in- para Alves[4] “se antepõe a bases nominais e verbais (...) e tem-se associado bastante a bases adjetivais formadas com o sufixo -vel”. Já o não- “prefixa-se a bases substantivas e adjetivas a fim de negar-lhes totalmente o significado”[4]

Moura[65] destaca dois fatores que influenciam no uso de um dos prefixos citados: a aceitação no meio profissional e a melhor representação do fato a ser caracterizado. Do ponto de vista lingüístico, ratificando Alves, sugere o não- como o mais adequado para a formação de novos substantivos.

Considerando as informações apresentadas e objetivando uniformizar a terminologia, propõe-se utilizar o prefixo não- para formar os substantivos que expressam os eventos complementares das funções utilizadas para determinarem a qualidade temporal. Assim:

- Não-confiabilidade ($F(x)$) é o substantivo que expressa o evento complementar da confiabilidade. É a probabilidade de um item não desempenhar uma função requerida, ou seja, de estar em falha para um determinado período de uso, sob certas condições previamente estabelecidas;
- Não-mantenabilidade ($N(x)$) é o substantivo que representa o evento complementar da manutenibilidade. É a probabilidade de um item não ser mantido ou não ser recolocado no estado de operação, dado que a função manutenção não está sendo executada sob determinadas condições e mediante os procedimentos e meios inicialmente prescritos;
- Não-disponibilidade ($I(x)$) é o substantivo que representa o evento complementar da disponibilidade. É a probabilidade do item não estar em condições de funcionamento, no período de tempo determinado.

3.3 Definição de confiabilidade

A definição de confiabilidade encerra um conceito que está diretamente associado às leis de degradação física do item. Embora a atenção com a degradação seja antiga, a confiabilidade como uma teoria específica é recente e vem sendo usada há aproximadamente 40 anos.

Nesse período consolidaram-se algumas definições de confiabilidade:

- Confiabilidade “é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida, sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo” [5];
- Confiabilidade “é a probabilidade de um produto comportar-se adequadamente, sob determinadas condições de operação, em um dado período de tempo”[71];
- Confiabilidade “é a probabilidade de um item satisfazer uma função requerida, nas condições fixadas, por uma período de tempo estabelecido” [24, 38];
- Confiabilidade de um objeto (componente, sistema, etc.) “é a sua capacidade expressa por uma probabilidade de:
 - funcionar corretamente (cumprir a missão requerida),

- por um período de tempo estabelecido,
- em condições operacionais e ambientais especificadas". [38]

As definições propostas são praticamente idênticas. Observa-se que as definições envolvem quatro estruturas fundamentais: **probabilidade, comportamento adequado, período de uso (ou de vida) e condições de uso.**

A **probabilidade** fornece a entrada numérica inicial para avaliação da confiabilidade. Para isso, não existe uma simples fórmula ou uma única técnica. Elas dependem do problema existente e das condições de contorno estabelecidas. Muitos são os autores que discutem a maneira mais adequada de se fazer o levantamento dos dados[21,72,63,45]. A validade de análise do sistema está diretamente relacionada com a validade do modelo usado para representar o sistema. A probabilidade está normalmente associada a variáveis aleatórias, vinculadas:

- ao número de falhas que ocorrerá num período especificado de uso;
- ao tempo, distância, ciclos médios até (entre) falhas;
- ao tempo médio de parada ou tempo de parada do dispositivo;
- à perda de rendimento esperada devido à falha;
- à perda de produção esperada devido à falha.

O **comportamento adequado** necessita da existência de um padrão, anteriormente definido. Esse padrão pode estar associado à média ou a um critério de medida efetiva, que se usa para comparar o comportamento do que se deseja avaliar. É evidente que esse padrão apresentará dispersões em relação a uma referência ideal. Torna-se necessário, então, estabelecer alguns referenciais para medir a dispersão, como desvio padrão, análise de correlação, a fim de orientar-se acerca do comportamento do item em análise.

O **período de uso (de vida ou de tempo)** deve ser analisado a partir da premissa básica de que a falha ocorrerá, mais cedo ou mais tarde. Nesse caso também é importante que seja definido um período padrão ou período de referência[44]. Esses períodos, classificados normalmente como contínuos ou discretos, vão depender das condições de uso e principalmente do tipo de informação a ser obtida. A denominação "período" pode estar associado ao tempo [71,24] e é chamado de intervalo, pela norma ABNT5462[5]. Neste

trabalho, o termo período (de uso ou de vida), será utilizado para expressar a distância percorrida em (km), o número de ciclos (n) ou o tempo em (h) de funcionamento normal do item. Nas normas da ABNT [6,8,9,10,11] têm-se explicitados outros períodos:

- período de falhas devido à deterioração;
- período de falhas inicial;
- período de taxa de falhas constante.

É senso comum, utilizar o termo período, para situações como:

- período de vida útil;
- período de uso desejado;
- período de garantia.

As **condições de operação** referem-se à adequação do ambiente de uso relativo às variáveis de projeto inicialmente fixadas. Essa condição necessita ser bem definida, dado que o sucesso de um evento pode não se manter, se as premissas anteriormente estabelecidas forem alteradas. É importante definir padrões de pressão, temperatura, umidade, esforços, deformações, número de ciclos, distância percorrida etc., para garantir a confiabilidade inicialmente proposta.

3.4 Definição matemática da confiabilidade

Matematicamente, a definição de confiabilidade é obtida a partir do estabelecimento dos limites do período de vida (x), definidos para o cálculo da probabilidade de falha, $F(x)$. Assim, para um período de vida inicial ($x \rightarrow 0$) tem-se $F_{(x \rightarrow 0)} \rightarrow 0$. Nessa situação a confiabilidade é assegurada pela qualidade de todos os processos envolvidos na produção do produto. Já para um período de vida muito grande, tendendo para infinito ($x \rightarrow \infty$), a probabilidade de falha tende a se aproximar da unidade, ou seja, $F_{(x \rightarrow \infty)} \rightarrow 1$. A expressão matemática assim definida fornece a função de distribuição de falha acumulativa ($F(x)$) que, como visto, aumenta de zero até a unidade, na medida em que a variável aleatória (x) se desloca do menor para o maior valor.

Em muitos casos práticos, e particularmente na análise dos sistemas de freio, optou-se por não avaliar a distribuição de falha acumulativa ($F(x)$), mas sim, a probabilidade de sobrevivência, também chamada de “confiabilidade estimada” ou simplesmente de confiabilidade ($R(x)$). Ela é determinada a partir de observações experimentais ou de uso, dada pela seguinte relação:

$$3.1 \quad R(x) = \frac{N_s(x)}{N_o(0)} \leq 1$$

onde

x = variável aleatória que representa a vida, podendo ser expressa na unidade de tempo (h), número de ciclos (n) ou distância percorrida (km);

$N_s(x)$ = é a quantidade de itens em bom funcionamento para a vida x ;

$N_o(0) = N_o$ = é a quantidade total de itens em bom funcionamento no início do ensaio ou da observação. Logo $N_o = N_s(x) + N_f(x)$, e

$N_f(x)$ = é a quantidade de itens que falharam durante o período de vida x .

Dada esta relação, a equação da confiabilidade pode ser reescrita como:

$$3.2 \quad R(x) = \frac{N_s(x)}{N_o}$$

$$3.3 \quad R(x) = \frac{N_o - N_f(x)}{N_o} = 1 - \frac{N_f(x)}{N_o}$$

A função de distribuição de falha acumulativa, ou simplesmente não-confiabilidade, $F(x)$, é

$$3.4 \quad F(x) = \frac{N_f(x)}{N_o}$$

Substituindo de $F(x)$ na $R(x)$ anterior, obtém-se

$$3.5 \quad R(x) = 1 - F(x)$$

A derivada da função de confiabilidade em relação a x gera a função densidade de probabilidade de falha $f(x)$, conhecida como (fdp),

$$3.6 \quad f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = -\frac{dR(x)}{dx}$$

Relacionando as equações (3. 4) ,(3. 5) e (3. 6), obtém-se

$$3.7 \quad f(x) = \frac{1}{N_o} \frac{dN_f(x)}{dx}$$

As equações da não-confiabilidade $F(x)$ e da Confiabilidade $R(x)$ podem agora ser reescritas em função da densidade de probabilidade de falha $f(x)$. Integrando esta função no período de vida x , obtém-se:

$$3.8 \quad F(x) = \int_0^x f(x)dx$$

e

$$3.9 \quad R(x) = 1 - \int_0^x f(x)dx$$

Os respectivos valores da não-confiabilidade e da confiabilidade estão representados na figura abaixo, pela área sob a curva da função de densidade de falha hipotética.

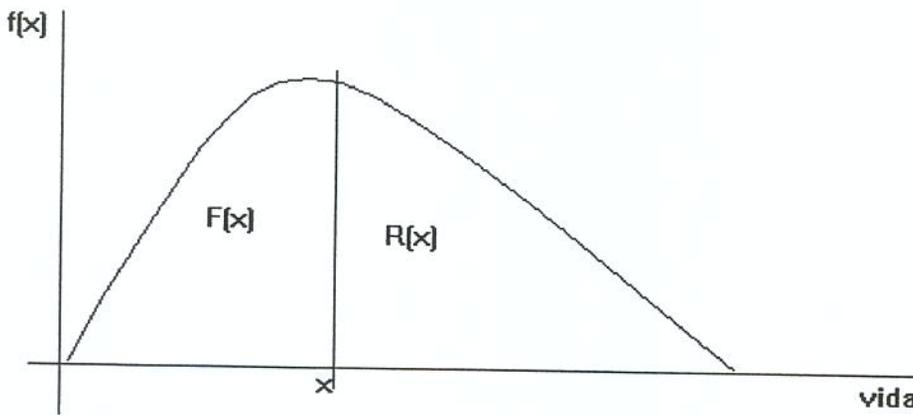


Figura 3. 1 Função densidade de probabilidade de falha hipotética $f(x)$ em função da vida x . [20]

Considerando que a área sob a curva deve ser unitária, pode-se reescrever a equação da confiabilidade como

$$3.10 \quad R(x) = \int_x^{\infty} f(x)dx$$

Alguns autores [20,71] comentam que a probabilidade de falha é mais facilmente descrita em termos da taxa instantânea de falha (tif) $\lambda(x)$. Evidentemente, essa taxa de falha não é simplesmente o número de falhas que ocorre num determinado período de observação. Ela

depende também do tamanho da amostra a ser considerada, do número de falhas que ocorreu na amostra naquele período de observação, ou de qualquer outro parâmetro caracterizador do período de uso.

$$3.11 \quad \lambda(x) = \frac{\text{numero de falhas na unidade de uso}}{\text{numero de componentes expostos a falha}}$$

A taxa instantânea de falha $\lambda(x)$ é obtida relacionando instantaneamente o número de falhas com o número de itens expostos à falha. Do ponto de vista da definição, a taxa instantânea de falha é comparável à função densidade de probabilidade, $f(x)$. No limite, quando o período de análise tende para zero ($x \rightarrow 0$), elas se equivalem. A diferença básica está no significado físico das definições. A função densidade de probabilidade de falha (fdp) permite avaliar a probabilidade de falha em qualquer tempo futuro, desde que se disponha dos parâmetros da distribuição de probabilidade. A taxa instantânea de falha (tif) é indicada para avaliar a probabilidade de falha num período próximo ao de uso, ou para os itens que tenham sobrevivido até ao período (x). [20]

A taxa instantânea de falha $\lambda(x)$ é definida por,

$$3.12 \quad \lambda(x) = \frac{1}{N_s(x)} \frac{dN_f(x)}{dx}$$

Multiplicando o numerador e o denominador por N_o , resulta:

$$\lambda(x) = \frac{N_o}{N_o} \frac{1}{N_s(x)} \frac{dN_f(x)}{dx}$$

$$\lambda(x) = \frac{N_o}{N_s(x)} \frac{1}{N_o} \frac{dN_f(x)}{dx}$$

$$3.13 \quad \lambda(x) = \frac{1}{R(x)} f(x)$$

Quando $x \rightarrow 0$, implica que $R(0) \rightarrow 1$, logo, pela equação (3.13), vê-se que $\lambda(x) \rightarrow f(x)$. A equação da taxa instantânea de falha pode ainda ser definida em função somente da densidade de probabilidade de falha,

$$3.14 \quad \lambda(x) = \frac{f(x)}{\int_0^x f(x) dx}$$

Das equações 3.6 e 3.10 obtém-se a taxa instantânea de falha em relação à função de sobrevivência ou confiabilidade $R(x)$,

$$3.15 \quad \lambda(x) = \frac{-1}{R(x)} \frac{dR(x)}{d(x)}$$

Integrando ambos os lados da equação $\lambda(x)$ (3. 15), e admitindo que:

- quando $x' = 0$, implica que $R(x'=0) \rightarrow 1$;
- por sua vez, se $x' = x$, implica que $R(x'=x) \rightarrow R(x)$;

resulta

$$3.16 \quad \int_x^{R(x)} \frac{1}{R(x)} dR(x) = \int_0^x -\lambda(x) dx$$

Resolvendo a integral, obtém-se

$$\ln R(x) = \int_0^x -\lambda(x) dx$$

$$3.17 \quad R(x) = e^{-\int_0^x \lambda(x) dx}$$

A equação (3. 17) é chamada de equação geral da confiabilidade. Muitos autores tratam dessas definições matemáticas. Os autores Ramakumar[78], Catuneanu e Mihalache[27], Lewis[56], Billinton e Allan[20], Bompas-Smith [21] e O'Connor [68] o fazem de forma clara e objetiva.

3.5 Equações da confiabilidade para a Distribuição de Weibull

A distribuição que leva o nome de Waloddi Weibull tem a importante propriedade de não possuir um formato característico. Foi apresentada em 1951, com o nome de “*a Statistical distribution function of wide applicability*”[89]. De fato, essa distribuição probabilística, por ser tripamétrica, torna-se mais flexível e melhor se ajusta aos resultados experimentais e operacionais utilizados na maioria das aplicações em engenharia[62,91,83,7,1].

Algumas distribuições, de significativa importância para a engenharia, podem ser entendidas como casos particulares da distribuição de Weibull. Para o parâmetro de forma $\beta = 1$, a distribuição probabilística de Weibull, por exemplo equivale à distribuição Exponencial;

para o caso de $\beta = 2$, se aproxima da distribuição de Rayleigh; para $\beta = 3,44$, se aproxima da distribuição Normal ou Gaussiana. No limite, quando β assume valores muito grandes, a função densidade de probabilidade de falha (fdp) tende a concentrar todos os pontos em torno do valor médio [72,63,24,20]. Para esse valor de β , tem-se perfeitamente definida a posição de descarte dos itens não-reparáveis, ou a posição de manutenção para os itens reparáveis.

Devido à ampla utilização, a distribuição é representada de forma diversificada. Hallinan [43] fez um levantamento dessas diferentes formas e as ordenou em função da utilização. Neste trabalho a função densidade de probabilidade (fdp) da distribuição de Weibull é:

$$3.18 \quad f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^\beta}$$

onde $x > 0$, $\beta > 0$ e $\alpha > 0$, e

β = parâmetro de forma;

α = parâmetro de escala ou vida característica;

γ = parâmetro de localização ou vida inicial;

x = vida, definida na unidade de tempo (h), de distância percorrida (km) ou ciclos (n).

Nesta forma triparamétrica, a distribuição leva em consideração o período de vida do item, desde a fase inicial de funcionamento, incluindo-se período de teste, até o uso efetivo.

Para componentes, subsistemas e sistemas mecânicos de forma geral, a vida inicial é normalmente muito pequena quando comparada com a vida de uso, ou seja $\gamma \ll x$. Pode, assim, ser desconsiderada da equação da função densidade. Então,

$$3.19 \quad f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta}$$

Integrando em relação a x , obtém-se a função confiabilidade

$$3.20 \quad R(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta}$$

quando $x = \alpha$, então $R(x) \cong 36,7\%$. Este ponto é chamado de ponto característico. Nessa situação a vida característica, definida por α_0 , é inversamente proporcional à taxa de falha

característica, definida por λ_o , igual a $\alpha_o = 1/\lambda_o$. Fazendo as alterações na equação (3. 19) vem:

$$3. 21 \quad f(x) = \beta (\lambda_o)^\beta (x)^{\beta-1} e^{-(\lambda_o x)^\beta}$$

$$3. 22 \quad \lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \beta \lambda_o (\beta) (x)^{\beta-1}$$

$$3. 23 \quad R(x) = \int_x^\infty f(x) dx = e^{-(\lambda_o x)^\beta}$$

$$3. 24 \quad F(x) = 1 - R(x) = 1 - e^{-(\lambda_o x)^\beta}$$

Para o caso particular da distribuição exponencial, onde $\beta = 1$, a vida característica α_o corresponde a período de uso médio até falhas ou período de uso médio entre falhas, também chamado de Tempo Médio Até Falha (TMAF) ou Tempo Médio Entre Falha (TMEF). A taxa de falha característica é então

$$3. 25 \quad \lambda_o = \frac{1}{\alpha_o} = \frac{1}{TMAF}$$

3.5.1 Influência do parâmetro de forma (β)

O parâmetro de forma β é uma variável que caracteriza o nível de tecnologia que está agregado ao item em análise. Quanto maior β , menor será a dispersão das falhas na amostra que está sendo analisada. A partir do parâmetro de forma pode-se fazer inferências sobre as variáveis de projeto, processo de produção e uso.

Alerta-se que os valores colocados na ordenada dos gráficos da função densidade de probabilidade (fdp), da taxa instantânea de falha (tif), são válidos somente para a linha traçada em azul. Os valores existentes nos gráficos são os mesmos que estão nas tabelas. Para as outras curvas, a escala da ordenada é apenas qualitativa. As diferenças entre as curvas, do ponto de vista quantitativo, podem ser significativas. Tal diferença ocorre devido à sistemática de programação. Já para os gráficos da confiabilidade (R) e da não-confiabilidade (F), a relação entre a escala da ordenada e as curvas para os diferentes parâmetros de forma é direta.

A Figura 3. 2 apresenta a influência de β sobre a função densidade de probabilidade de falha (fdp). A taxa de falha será mantida constante ($\lambda = 2 \times 10^{-6}/\text{km}$), e β assumirá valores tais como: 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; e 7,0. Os valores do parâmetro de forma (β) foram adotados de maneira a tornar-se significativa a sua variação sobre as funções. O gráfico da fdp está na escala linear.

Na Figura 3. 3 tem-se a influência de β sobre a taxa instantânea de falha (tif), também chamada de $\lambda(x)$, na escala linear. Observa-se que quando $\beta = 1$ a distribuição de Weibull tem a taxa de falha constante, ou seja, equivale à distribuição Exponencial. Se $\beta < 1$, as falhas se concentram no início da vida. Essa situação é característica de itens com problemas no projeto ou no processo de fabricação.

As funções confiabilidade e não-confiabilidade na escala linear estão apresentadas nas Figura 3. 4 e Figura 3. 5.

A Figura 3. 6 mostra a influência do parâmetro de forma sobre a confiabilidade na escala de Weibull, para os mesmos componentes utilizados nas escalas lineares. Nesse caso, porém, as curvas são linearizadas

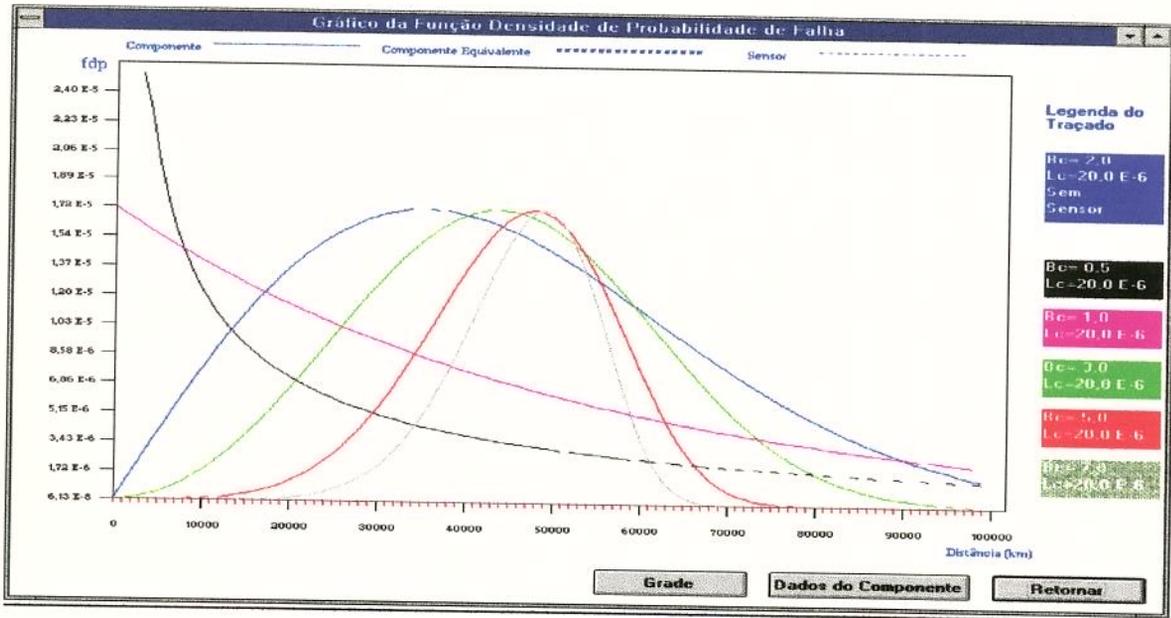


Figura 3. 2 Influência de β sobre a Função densidade de probabilidade (fdp) para a escala linear.

Observa-se que no ponto característico os gráficos se encontram, independente do valor de β . Nesse ponto a vida característica é equivalente à vida do componente, cujo valor de confiabilidade é de 36,7% e de não-confiabilidade é 63,3%.

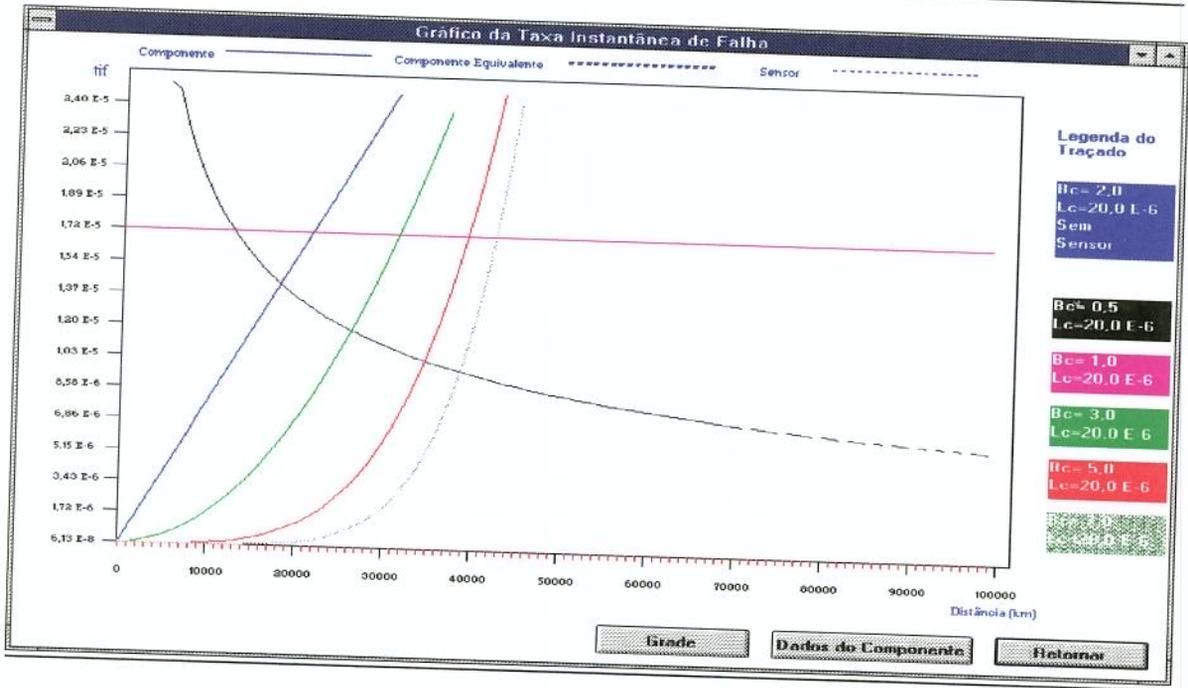


Figura 3. 3 Influência de β sobre a tif para a escala linear.

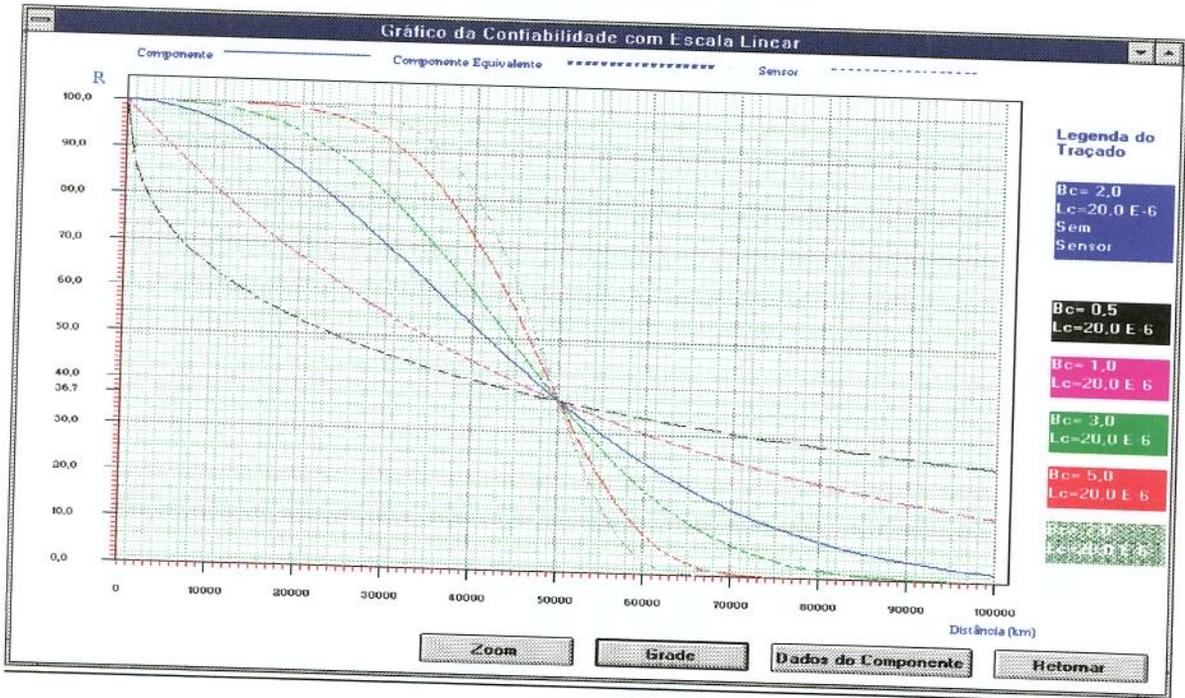


Figura 3. 4 Influência de β sobre a confiabilidade para a escala linear.

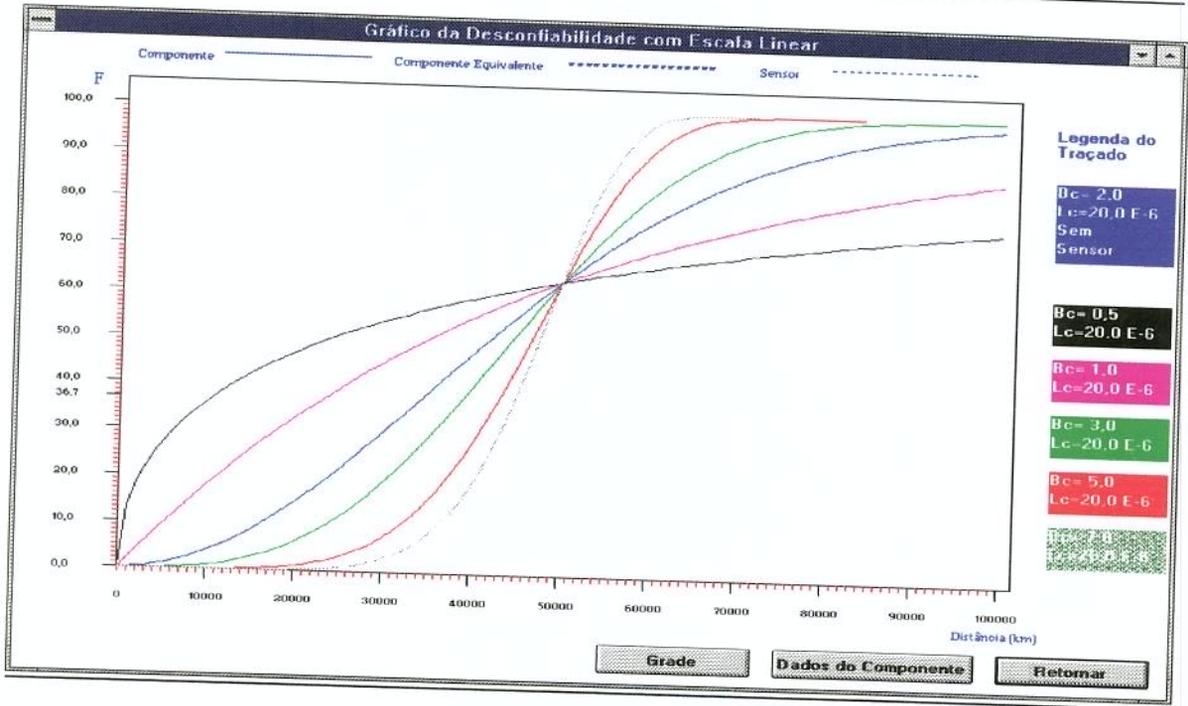


Figura 3. 5 Influência de β sobre a não-confiabilidade para a escala linear.

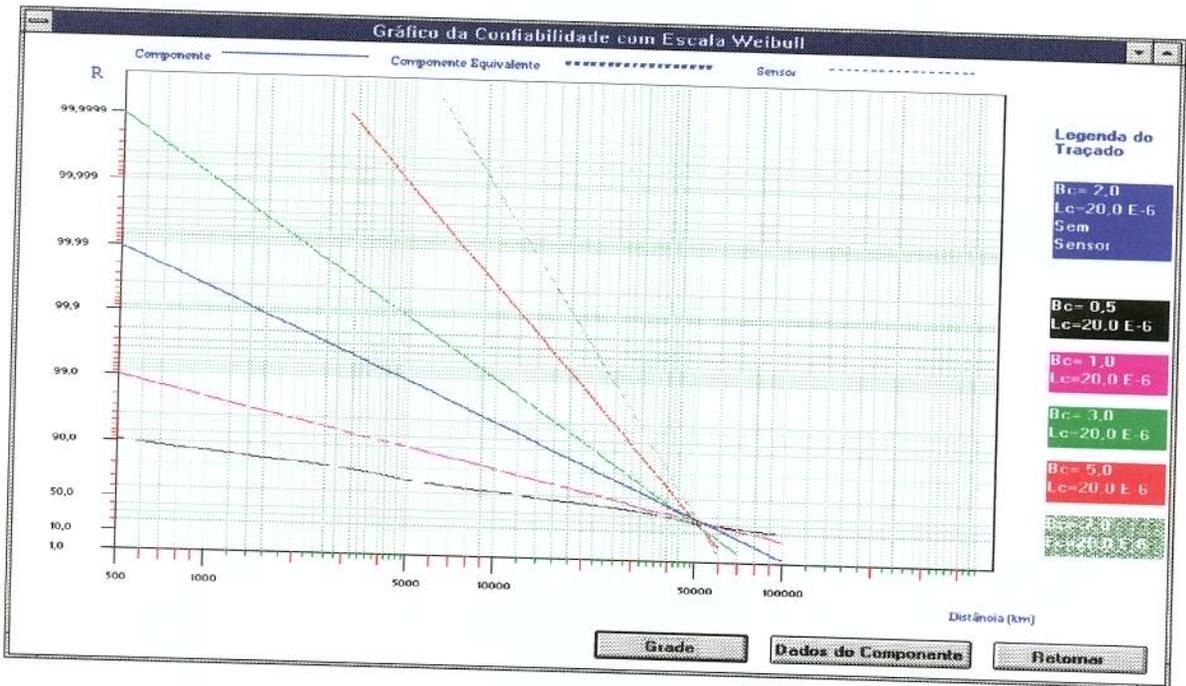


Figura 3. 6 Influência de β sobre a confiabilidade para a escala de Weibull.

3.5.2 Influência da taxa de falha (λ).

A taxa de falha λ , como o próprio nome sugere, indica a quantidade média de falhas de um item em relação à unidade de uso. A melhoria da qualidade tende a diminuir o índice de taxa de falha, repercutindo no aumento da vida média. Para verificar essa variação, construíram-se através do programa BRAKEREL as figuras abaixo, para as seguintes taxas de falha: 20×10^{-6} , 100×10^{-6} , 50×10^{-6} , 30×10^{-6} , 10×10^{-6} e $0,1 \times 10^{-6}$. O parâmetro de forma foi mantido constante, $\beta = 2,0$.

A Figura 3. 7 mostra a influência da taxa de falha sobre a função densidade de probabilidade de falha (fdp), na escala linear. Fica claro que quanto menor é a taxa de falha, menor é a concentração das falhas no início da vida do item.

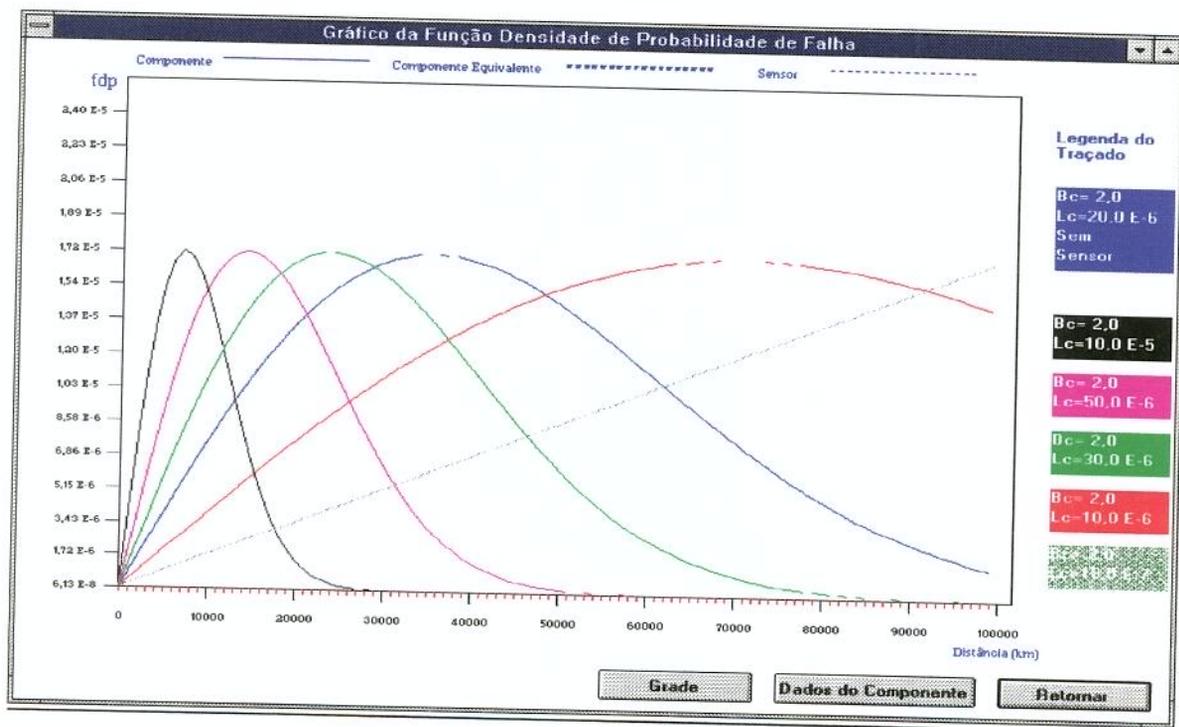


Figura 3. 7 Influência de λ sobre a função densidade de probabilidade (fdp) para a escala linear.

A taxa instantânea de falha, na escala linear, é mostrada na Figura 3. 8.

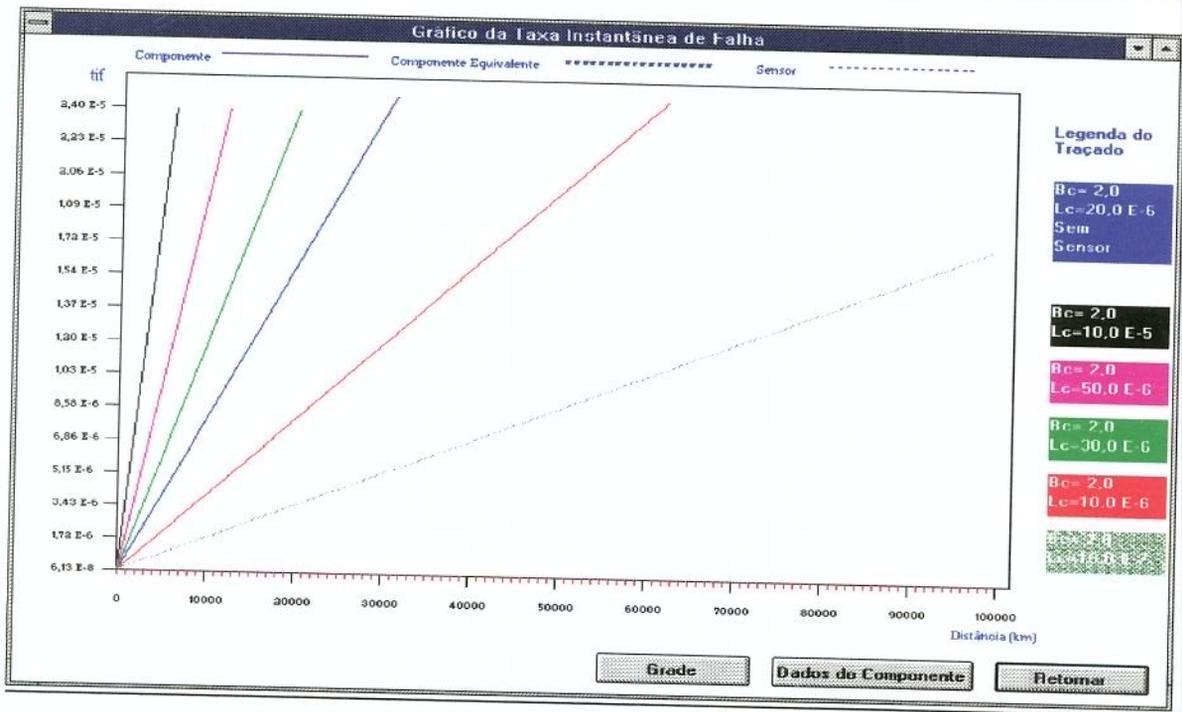


Figura 3. 8 Influência de λ sobre a taxa instantânea de falha (fdp) para a escala linear.

Nas Figura 3. 9 e Figura 3. 10 vê-se a variação da função confiabilidade e não-confiabilidade com a taxa de falha na escala linear. À medida que diminui a taxa de falha, aumenta a confiabilidade do item, desde que o parâmetro de forma permaneça constante. Para a não-confiabilidade ocorre o inverso.

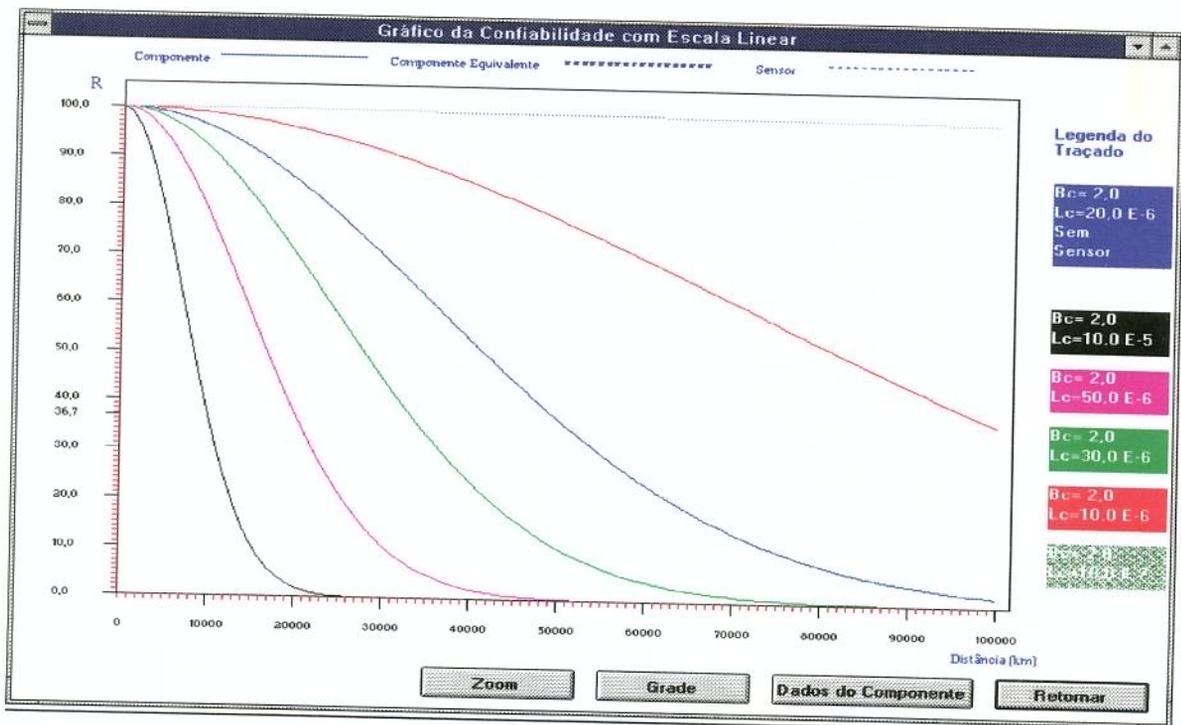


Figura 3. 9 Influência de λ sobre a confiabilidade para a escala linear.

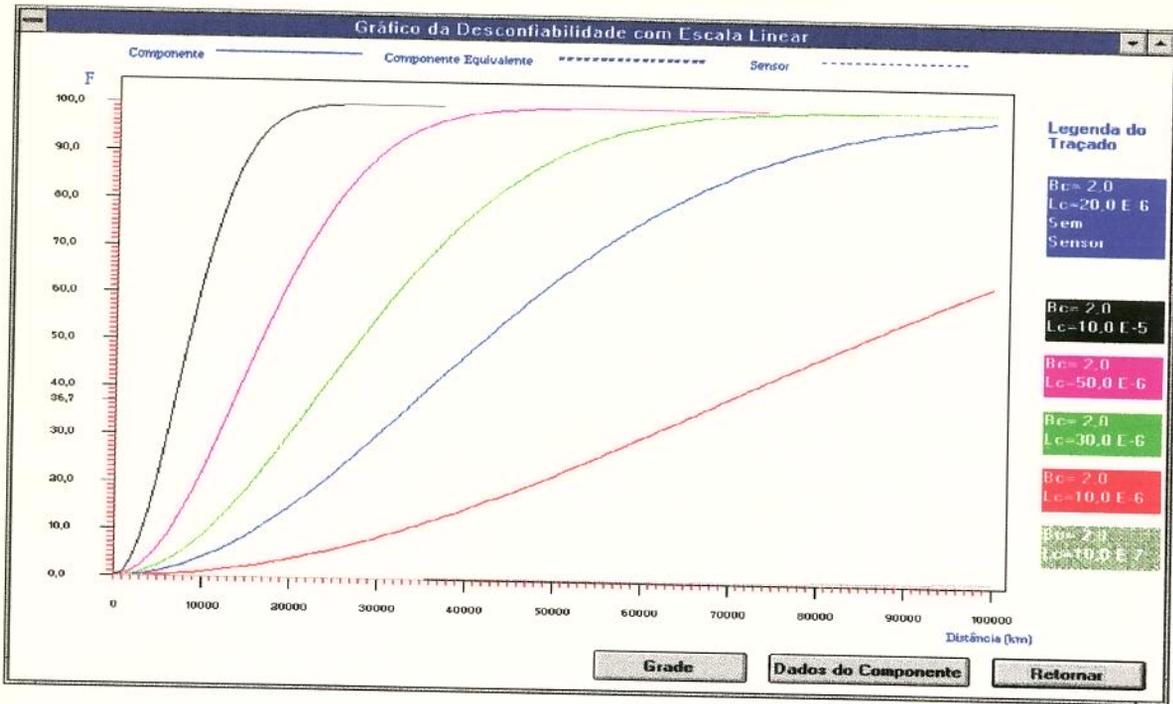


Figura 3. 10 Influência de λ sobre a não-confiabilidade para a escala linear.

3.5.3 Influência dos parâmetros β e λ , simultaneamente

Na prática, qualquer interferência no projeto de um item objetivando implementar melhorias ou adaptações, pode proporcionar alterações na vida do item. As alterações executadas influem na vida média com repercussão na dispersão das falhas durante a vida do item. Isso leva à necessidade de redefinir os parâmetros da função probabilística de Weibull. O caso mais comum é ocorrer a modificação simultaneamente de β e λ . A complexidade da análise dos resultados aumenta.

As Figura 3.11 e Figura 3.12 mostram as curvas para a função densidade de probabilidade (fdp) na escala linear e da função confiabilidade $R(x)$ na escala de Weibull, quando se tem variação do parâmetro de forma e da taxa de falha, simultaneamente. Na escala de Weibull é mais fácil o analista fazer projeções a “priori” e a “posteriori” dos dados disponíveis.

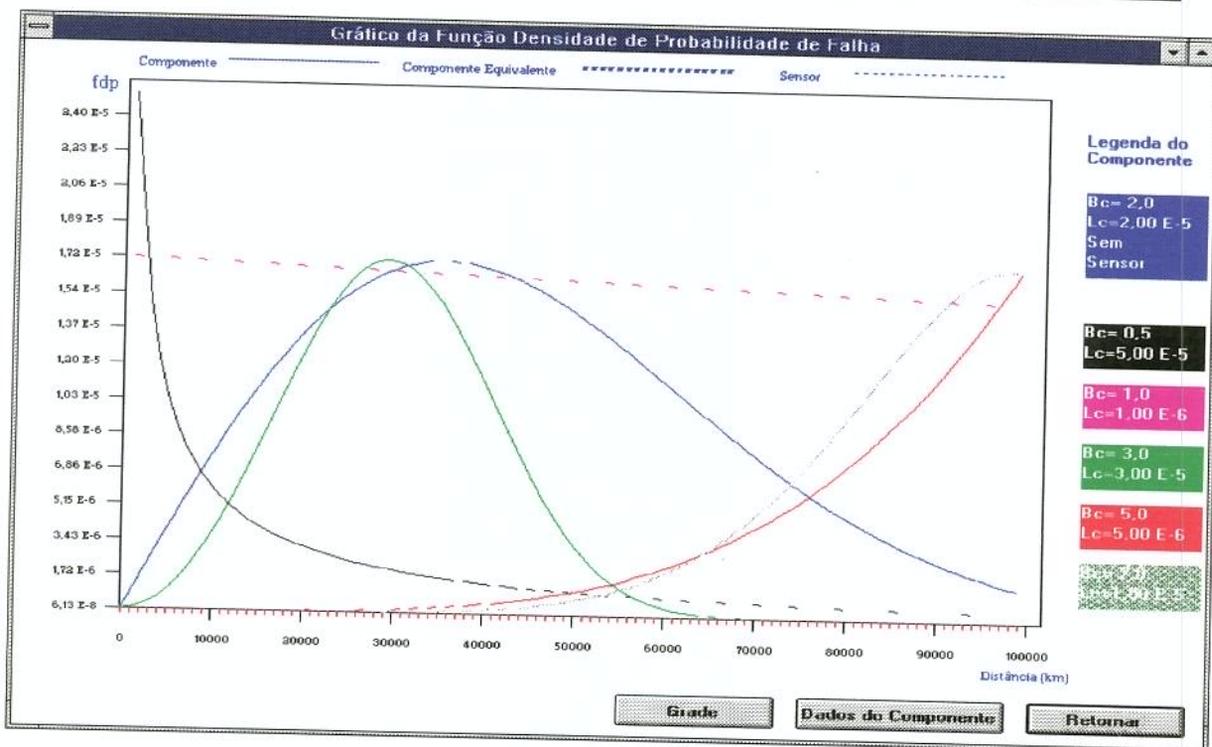


Figura 3. 11 Influência de λ e β sobre a fdp para a escala linear.

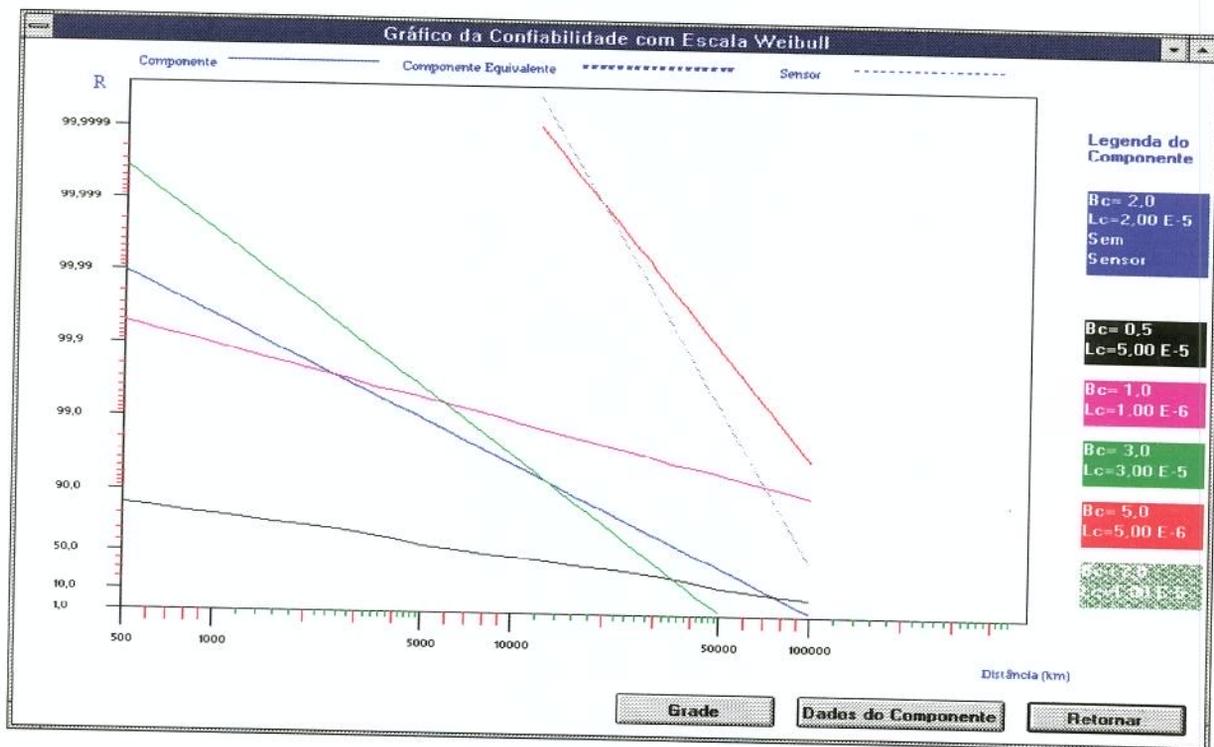


Figura 3. 12 Influência de λ e β sobre a função confiabilidade para a escala de Weibull.

3.6 Cálculo da probabilidade acumulada de falha pelo método da Categoria Mediana

O cálculo da confiabilidade vai depender das informações relativas às falhas obtidas dos itens que estão sendo analisados. Os métodos de ensaio são diversificados e apropriados a cada caso. O método da Categoria Mediana, por exemplo, é recomendado quando se têm os dados dos períodos de uso até (entre) falha ou até suspensão, mas com predominância dos primeiros. O objetivo do método é determinar os parâmetros (α, β, λ) da distribuição probabilística de Weibull. Se a predominância for das suspensões, então, recomenda-se o método do sucesso[45].

O método da categoria mediana parametriza os períodos de vida até a falha, para cada item testado, transformando essa informação em probabilidade acumulada de falha [45]. A técnica aplicada é, particularmente, importante para corrigir as distorções que eventualmente aparecem em virtude do pequeno número de itens ensaiados, como normalmente ocorrem na área da engenharia mecânica. Seu uso é recomendado pela Norma Brasileira NBR-6742/87[7].

A probabilidade acumulada de falha $F(x)$ é também conhecida por grau médio, “*Median Rank*”, categoria mediana, ou simplesmente, não-confiabilidade $F(x)$.

$$3.26 \quad \text{Grau Medio} = \frac{j_i (1 - \ln 2) - (2 \ln 2 - 1) \frac{j_i - 1}{N - 1}}{N}$$

sendo

j_i = número de ordem da falha

N = quantidade total de itens na amostra.

O método calcula o grau médio só para os itens que falharam. No entanto são levados em consideração também os itens que foram suspensos ou censurados, através do cálculo do incremento do número de ordem, Δj_s .

$$3.27 \quad \Delta j_s = \frac{(N + 1) - \text{numero de ordem falha anterior}}{1 + \text{numero de itens posteriores}}$$

o novo número de ordem será

$$3.28 \quad j_i = j_{i-1} + \Delta j_s$$

onde

j_s = é o número de ordem dos itens suspensos.

O número total de itens em teste é

$$3.29 \quad N = N_f + N_s$$

sendo N_f o número de itens falhos e N_s o número de itens suspensos e censurados

O grau médio é finalmente obtido e é registrado no gráfico de Weibull.

3.7 Determinação dos parâmetros da equação de Weibull

As informações contidas nos parâmetros da função probabilística de Weibull permitem ao analista fazer projeções da probabilidade de falha, tanto para o período anterior à ocorrência da primeira falha, quanto para o período posterior à ocorrência da última falha. Nesse sentido, a partir dos dados de uma amostra, mesmo que seja pequena, o projetista tem condições de fazer as estimativas concernentes ao comportamento de toda a população. Evidentemente, tal análise fica simplificada se ele utilizar o papel probabilístico de Weibull (PPW), que lineariza a função. Neste trabalho será utilizado o programa computacional BRAKEREL (*Brake Reliability Program*) para determinar os parâmetros, a partir do método da Categoria Mediana. As projeções serão tanto mais coerentes quanto maior for o número de dados e mais precisas forem as informações obtidas.

Para linearizar a equação de Weibull faz-se:

$$3.30 \quad R(x) = 1 - F(x) = e^{-(\lambda \cdot x)^\beta}$$

$$\ln R(x) = \ln(1 - F(x)) = -(\lambda \cdot x)^\beta$$

$$3.31 \quad \begin{aligned} \ln(-\ln(R(x))) &= \beta \cdot \ln \lambda + \beta \ln x \quad \text{ou,} \\ \ln(-\ln(1 - F(x))) &= \beta \cdot \ln \lambda + \beta \ln x \end{aligned}$$

Sendo a equação (3.31) a equação da reta pode, então, ser reescrita como:

$$3.32 \quad Y_i = C_a \cdot X_i + C_l$$

sendo

$$3.33 \quad Y_i = \ln(-1. \ln(R_i(x_i)))$$

$$3.34 \quad X_i = \ln(x_i)$$

$$3.35 \quad C_l = \beta \cdot \ln(\lambda)$$

onde $C_a = \beta$ = coeficiente angular e C_l é o coeficiente linear.

O coeficiente angular é obtido através do método dos mínimos quadrados [62,91,55],

$$3.36 \quad \beta = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} f (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^{N_f} f (X_i - \bar{X})^2}$$

sendo

$$3.37 \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} X_i}{N_f}$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} Y_i}{N_f}$$

onde N_f é o número de itens da amostra que efetivamente falharam, e X_i o período até a falha. O coeficiente linear é obtido em função de qualquer das variáveis X_i , Y_i da equação(3. 33 e 3. 34). Isolando o coeficiente linear C_l , e fixando as ordenadas e abcissas para os valores médios (\bar{Y} e \bar{X}) (3. 37), resulta

$$3.38 \quad C_l = \bar{Y} - C_a \bar{X}$$

mas

$$3.39 \quad C_l = \beta \ln(\lambda_o)$$

Com o valor de C_l determina-se a taxa de falha para a equação de Weibull:

$$3.40 \quad \lambda_o = e^{\frac{C_l}{\beta}}$$

Considerando $\beta = 1$, obtém-se a vida característica (α) ou parâmetro de escala para a distribuição exponencial

$$3.41 \quad \alpha_o = \frac{1}{\lambda_o}$$

O coeficiente de correlação simples, como dito por Whitmore[91] ou, segundo Meyer[58], coeficiente de correlação amostral (r) é

$$3.42 \quad r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Poderia, ainda, ser calculado o nível de confiança. Essa variável está fortemente vinculada ao tipo de ensaio, à quantidade de itens na amostra, às exigências contratuais relativa à qualidade etc. Como esses pontos não são objetos deste trabalho, não será determinado o nível de confiança.

3.8 Obtenção da Taxa de falha (λ) e parâmetro de forma (β) a partir do período até falha ou suspensão

Com os tempos até falha e até suspensão dos itens que compõem uma amostra, obtém-se os parâmetros da equação de Weibull utilizando o método da Categoria Mediana[7]. Os cálculos foram feitos via programa BRAKEREL. Para tanto, formulou-se uma amostra hipotética de válvula de pedal (código: Valv22) composta de 11 itens. Alguns desses itens apresentaram falhas e outros foram suspensos durante o ensaio. A seguir é apresentada a seqüência de passos para obtenção dos parâmetros, utilizando o BRAKEREL.

Na tela de menu principal (Figura 3. 13) faz-se a seleção do menu banco de dados. Através deste menu, acessa-se a tela onde se faz a criação e a alteração da amostra (

Figura 3. 14). Nela é permitido registrar uma nova amostra (código, descrição e unidade), selecionar uma amostra já registrada, atualizar, incluir novos dados e obter os

parâmetros da equação de Weibull. Pode também identificar o período de uso na unidade de tempo (h), ciclos (n) ou distância percorrida (km).

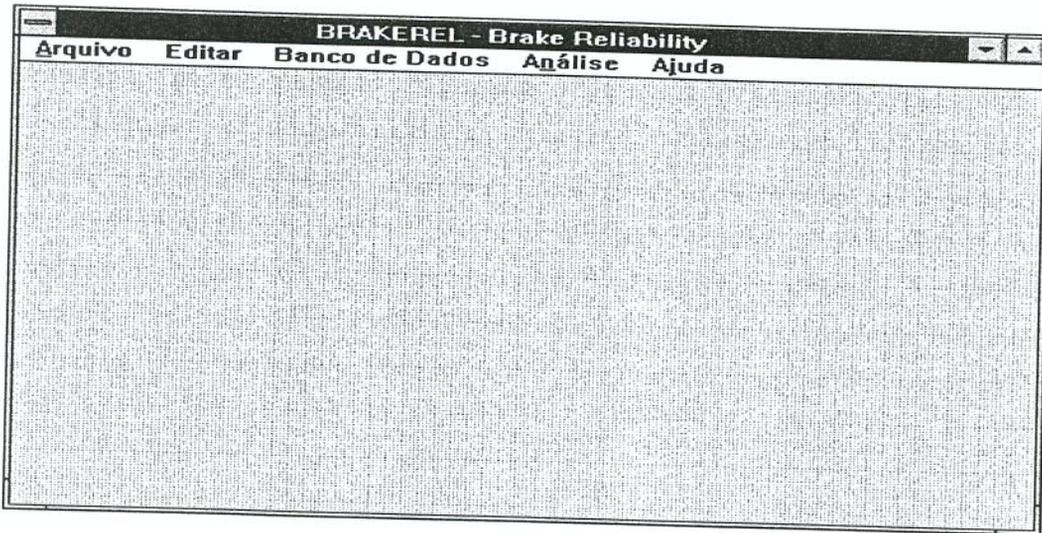


Figura 3. 13 Tela do menu principal

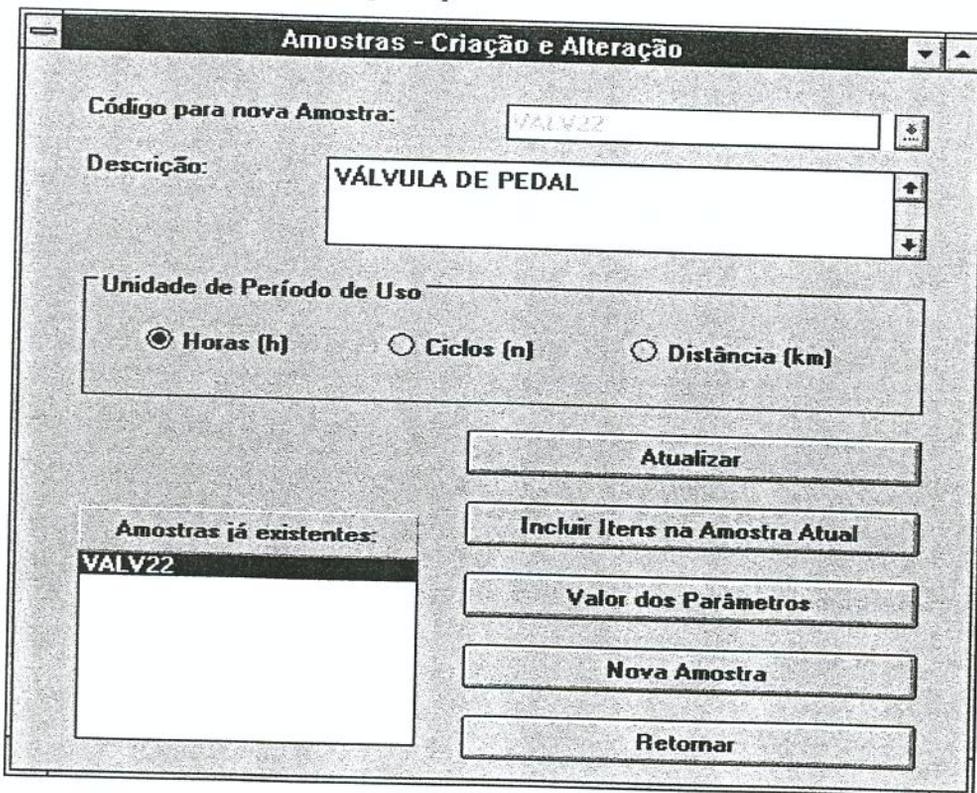


Figura 3. 14 Tela de criação e de alteração das amostras.

Após registrar a amostra, faz-se a inclusão dos itens da amostra, definindo o código e o período até falha ou suspensão, como mostrado na Figura 3. 15.

Na medida em que os registros vão sendo feitos, o programa vai atualizando os dados referentes aos parâmetros da equação de Weibull. Faz a ordenação dos tempos até falha ou

suspensão, redefinindo o número de ordem e apresentando os valores da categoria para os itens que falharam. O termo “categoria” é também chamado de categoria mediana, “rank” mediano[61], grau médio ou percentual de falha [7]. Ele representa a probabilidade acumulada de falha ou a não-confiabilidade do item que está sendo avaliado. Na tabela 3.1 é mostrado o cadastro de todos os itens (Valv22) que foram testados.

Figura 3. 15 Tela de inclusão do item na amostra

Tabela 3. 1 Tela de relatório dos itens da amostra

Cód.Item	Período (km)	F ou S	Núm. Ordem	Categoria
C005	20.000	F	1,00000	0,06301
C001	35.000	F	2,00000	0,15041
C002	55.000	S		
C004	73.000	F	3,11111	0,24752
C003	80.000	F	4,22222	0,34463
C010	85.000	F	5,33333	0,44174
C011	90.000	F	6,44444	0,53884
C007	95.000	F	7,55556	0,63595
C008	100.000	F	8,66667	0,73306
C006	120.000	S		
C009	120.000	S		

Para essa amostra foram obtidos os valores da taxa da falha característica, do parâmetro de forma e da vida característica que estão mostrados na Tabela 3. 2.

As informações sobre a amostra também podem ser sintetizadas na forma de gráfico, como exposto na Figura 3. 16. A partir desses gráficos, o analista pode fazer projeções sobre o comportamento da população que está sendo estudada, quanto à não-confiabilidade e confiabilidade, para a vida que desejar. Vê-se que a distribuição das falhas indicam a ocorrência de modos de falhas diferentes. Até a vida de 70.000 km, as falhas ocorreram numa dada frequência e segundo uma tendência, a partir dessa vida a tendência de ocorrência das falhas mudou de maneira significativa.

Tabela 3. 2 Tela com os valores dos parâmetros da distribuição de Weibull.

Parâmetros de Weibull para a Amostra		
Taxa de Falha Característica (Lambda) :	9,01	$\times 10^{-6}$
Parâmetro de Forma (Beta) :	1,649	
Vida Característica (Alfa) :	110987	h

Gráfico Tabela Retornar

3.9 A Taxa de falha (λ) e parâmetro de forma (β) são conhecidos

Nesse caso faz-se o registro dos dados diretamente na tela de cadastro do componente. Nessa tela são registrados os dados do componente (taxa de falha e parâmetro de forma) e a existência ou não de sensor. Caso haja sensor, faz-se o seu cadastro.

No menu principal (Figura 3. 13), seleciona-se o campo “análise” para obter as funções confiabilidade, não-confiabilidade, taxa instantânea de falha e função densidade de probabilidade de falha para o componente, tanto na forma de gráficos como na de tabelas.

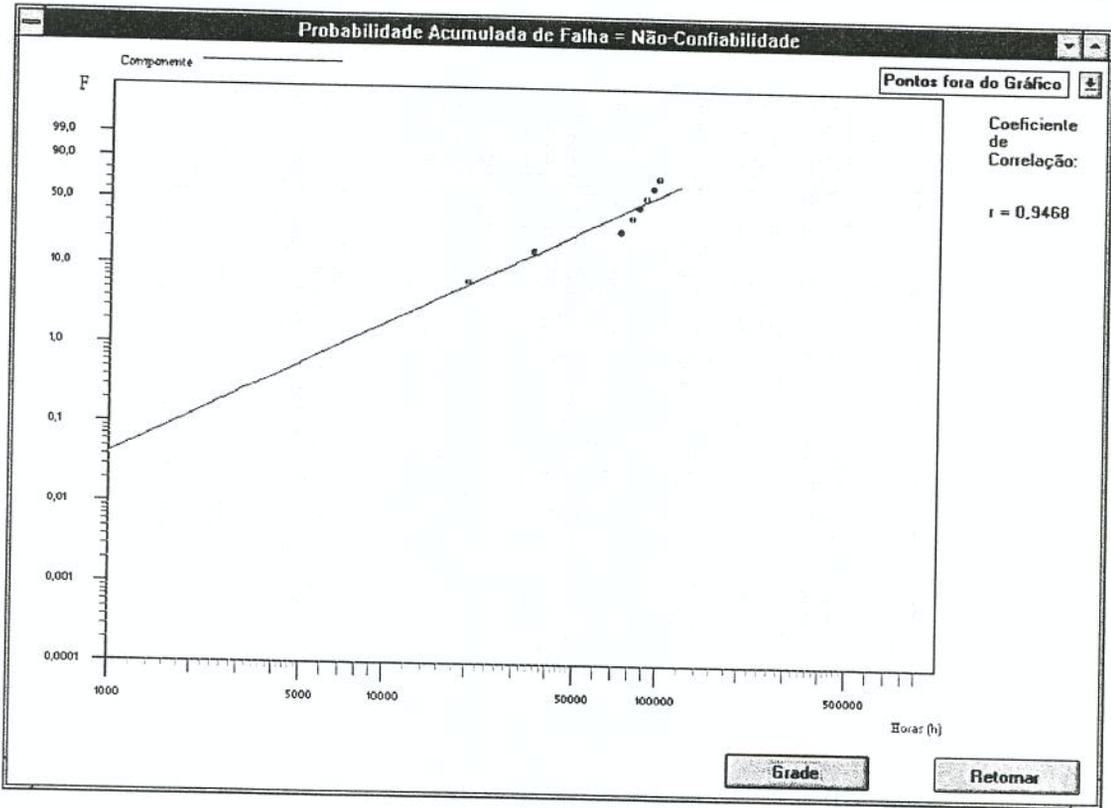


Figura 3. 16 Função não-confiabilidade para a VALV22 na escala de Weibull.

Cadastro de Componentes

Código do Componente: C0001

Descrição: COMPRESSOR

Taxa de Falha: 2.0 x 10⁻⁶ Parâmetro de forma: 1.5

Opção de Sensor

Sem Sensor Sensor Real Sensor Perfeito

Dados do Sensor

Código: _____

Descrição: _____

Taxa de Falha: _____ x 10⁻⁶ Parâmetro de Forma: _____

Gravar Retonar

Figura 3. 17 Cadastro dos componentes e sensores

3.10 Obtenção da Taxa de falha (λ) e parâmetro de forma (β) para uma confiabilidade desejada

Quando se conhece ou se deseja estimar os parâmetros da função probabilística de Weibull a partir de um determinado valor de confiabilidade $R(x)$, recomenda-se adotar inicialmente, parâmetro de forma (β) igual à unidade. A partir daí determina-se a taxa de falha característica λ_0 , e vida característica α_0 . Essa estimativa inicial orienta para o projeto e para a avaliação do componente ou sistema.

Analisando os dados sobre acidentes no Brasil e as perspectivas internacionais para falhas catastróficas do sistema de segurança veicular, discutido no capítulo 2, propõe-se estudar as seguintes questões:

- Qual deve ser a taxa de falha e a vida característica dos sistemas de freio pneumático, de ônibus e caminhões que trafegam no Brasil ?
- Qual o número mais provável de falhas catastróficas para toda a frota, por ano?

Para resolver estas questões, estabeleceram-se as seguintes premissas:

- estimou-se em 1.000.000 o número de caminhões e ônibus que trafegam no Brasil;
- cada veículo percorre, em média, 100.000 km por ano;
- considerou-se o parâmetro de forma β igual à unidade.

Para resolver o problema, construiu-se a

Tabela 3. 3, onde na coluna 1 é colocada a confiabilidade desejada por ano, para a frota de veículos em questão. Na coluna 2 foi calculada a falha total da frota de veículos. Na coluna 3 foi estimada a vida característica. Na coluna 4 tem-se a estimativa de falhas catastróficas para a frota nacional de veículos, em cada ano, em função dos níveis de confiabilidade estabelecidos e também considerando parâmetro de forma igual à unidade, ou seja, à distribuição exponencial.

A informação da coluna 3 ajuda o projetista a fazer estimativas de tempo de ensaio necessário para garantir a confiabilidade que se deseja.

É interessante observar que com a confiabilidade $R(x) = 99,99\%$, estima-se que ocorrem em torno de 100 falhas para toda a frota de veículo, durante um ano. Já para o referencial de

confiabilidade $R(x) = 90,00\%$, a estimativa é de 105.400 falhas de freio por ano para toda a frota, ou seja, uma falha para cada dez veículos.

Através do programa BRAKEREL fez-se uma análise comparativa entre os dados estimados. Substituíram-se as taxas de falha estimadas e o parâmetro de forma na tela de configuração gráfica (Figura 3. 18) do programa BRAKEREL. Nesta tela estão disponíveis todas as configurações de saídas no formato gráfico ou de tabela, para os cálculos realizados tanto para a escala de Weibull quanto para a escala linear. Pode-se inserir até 5 valores distintos de parâmetro de forma e taxa de falha. O programa permite analisar os dados considerando só a variação da taxa de falha, só a variação do parâmetro de forma, ou ambos.

Tabela 3. 3 Estimativa de λ_0 , α_0 e número de falhas, em função de $R(x)$ e β , para uma distância percorrida de 100.000 km/ano.

Confiabilidade adotada para 100.000 km/ano	Taxa de falha [1×10^{-9} falhas/km] para um ano ou 100.000km	Vida característica para 100.000 km/ano de uso	Nº de falhas ano para 1.000.000 veículos a 100.000 km/veículo
$R(1 \text{ ano}) \geq 99,99 \%$	$\lambda_0 \leq 1,0$	$1.000 \times 10^6 \text{ km/ano}$	$\geq 100 \text{ falhas/ano}$
$R(1 \text{ ano}) \geq 99,00 \%$	$\lambda_0 \leq 101,0$	$9,0 \times 10^6 \text{ km/ano}$	$\geq 10.100 \text{ falhas/ano}$
$R(1 \text{ ano}) \geq 95,00 \%$	$\lambda_0 \leq 513,0$	$1,0 \times 10^6 \text{ km/ano}$	$\geq 51.300 \text{ falhas/ano}$
$R(1 \text{ ano}) \geq 90,00 \%$	$\lambda_0 \leq 1.054,0$	$0,9 \times 10^6 \text{ km/ano}$	$\geq 105.400 \text{ falhas/ano}$

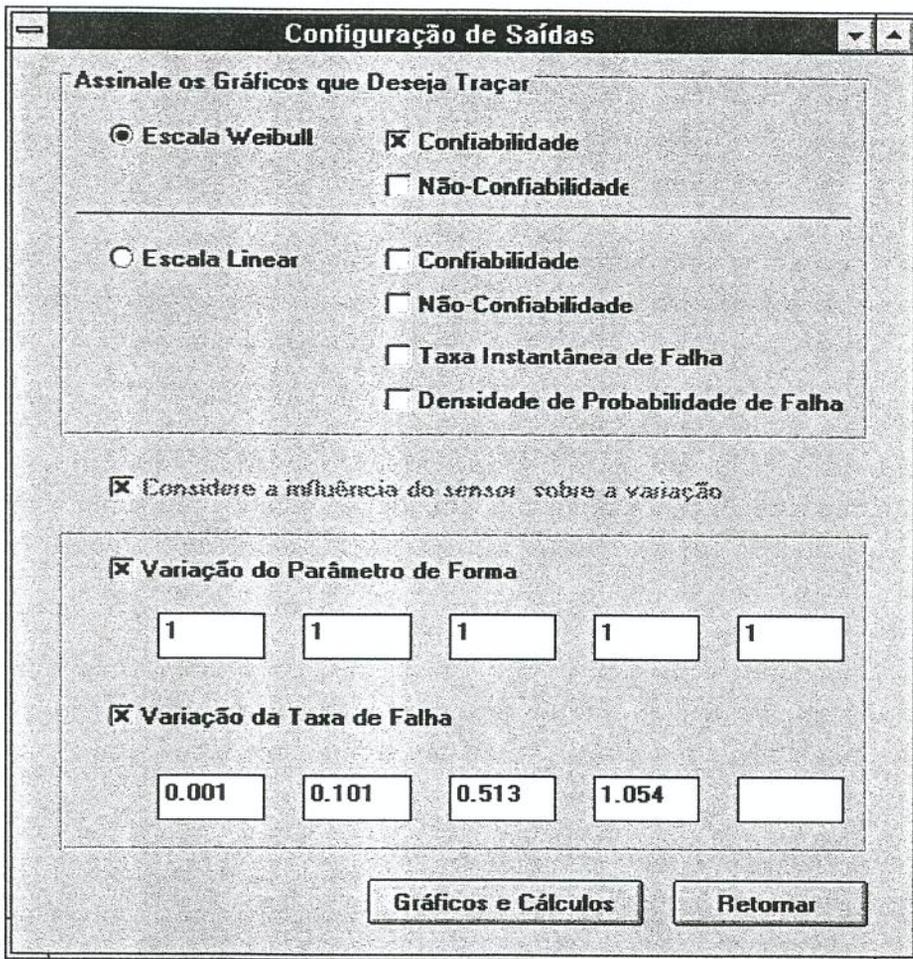


Figura 3. 18 Configuração da saída gráfica

Os resultados estão nas Figura 3. 19 e Figura 3. 20 Na primeira a estimativa foi feita para 100.000km ou um ano. Vê-se que a única condição para manter a confiabilidade maior ou igual a 99,99% para a distância de 100.000 km é para os sistemas que tenham a taxa de falha de 1×10^{-9} , e parâmetro de forma igual a um. Para as outras situações a confiabilidade no final da distância avaliada torna-se menor do que o estabelecido. Para a segunda estimativa, onde se considera que em 10 anos um veículo vá percorrer 1.000.000 km, todas as estimativas foram superadas no limite mínimo esperado para a confiabilidade.

Deve ser salientado que essa estimativa tem o objetivo de mostrar que a partir de informações encontradas na literatura, pode ser obtido valores de confiabilidades ou de parâmetros associados a ela, desde que estejam disponíveis ferramentas computacionais como o programa BRAKEREL.

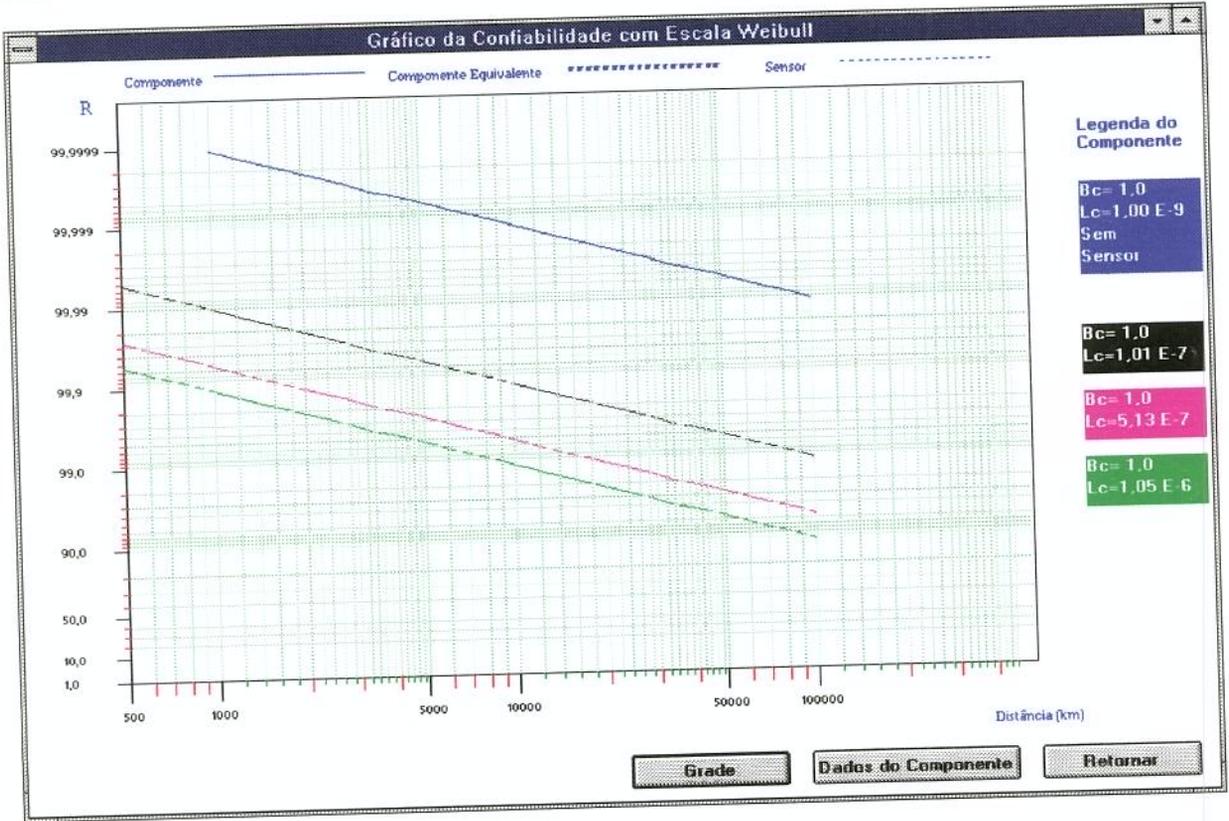


Figura 3. 19 Confiabilidade na escala de Weibull para λ_0 variável, $\beta = 1$ e $x = 100.000$ km.

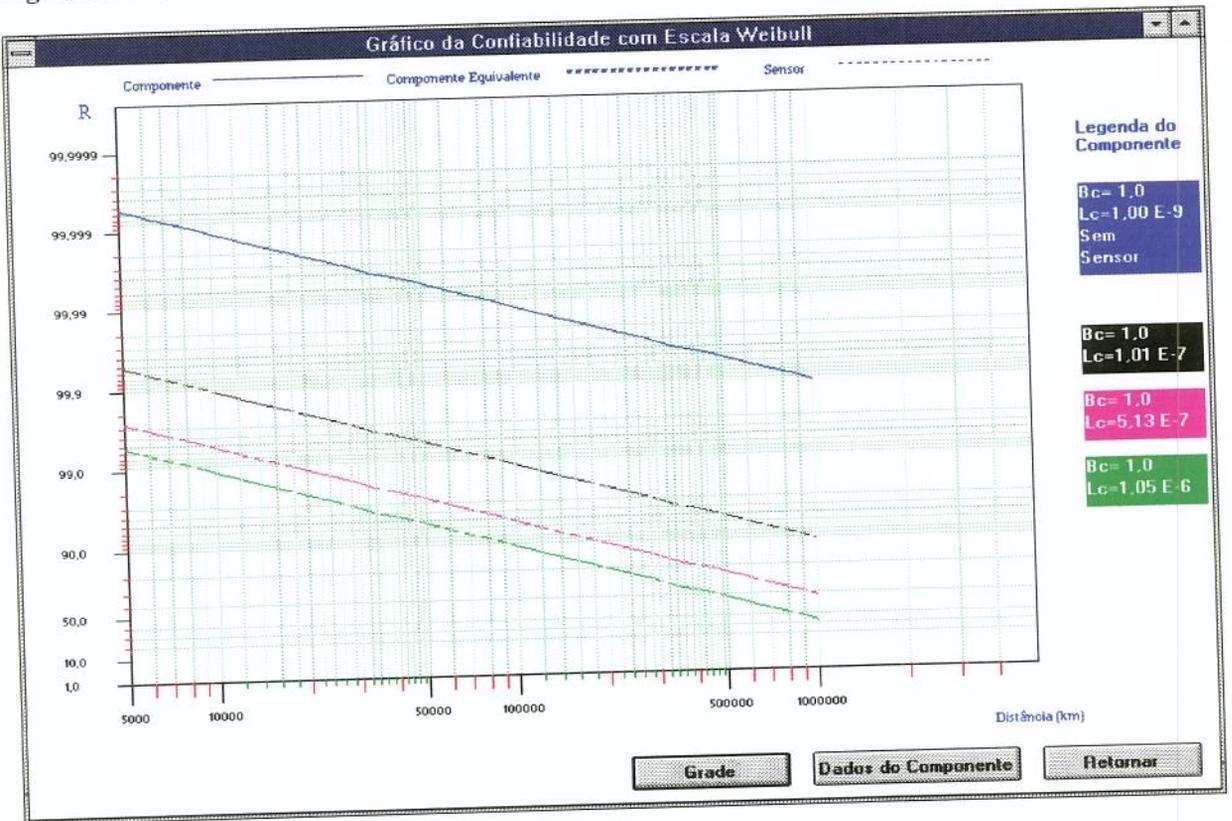


Figura 3. 20 Confiabilidade na escala de Weibull para λ_0 variável, $\beta = 1$ e $x = 1.000.000$ km.

3.11 Comentário

Nesse capítulo, apresentam-se as variáveis relativas ao cálculo das funções confiabilísticas para a distribuição probabilística de Weibull. Primeiramente, é feita uma proposição para a uniformização da terminologia a ser utilizada, optando-se por chamar de não-confiabilidade o complemento da função confiabilidade, de não-mantenabilidade o complemento da função mantenabilidade e de não-disponibilidade o complemento da função disponibilidade.

Fez-se, também, uma discussão detalhada sobre a definição de confiabilidade, apresentando as quatro estruturas fundamentais da definição de confiabilidade e o equacionamento matemático. Construíram-se gráficos para as funções confiabilísticas de Weibull, fazendo-se as variações dos parâmetros de forma (β) ou de taxas de falha (λ) ou de ambos simultaneamente.

Devido à importância do parâmetro de forma e da taxa de falha, apresentaram-se três formas de obtê-los:

- na presença de dados amostrais com período de uso até falha ou suspensão;
- quando se dispõe de indicações preliminares das taxas de falha e dos parâmetros de forma;
- quando o valor da confiabilidade é conhecido.

Os três casos foram estudados utilizando-se os recursos disponíveis no programa computacional BRAKEREL e expondo os resultados dos cálculos na forma de gráficos e de tabelas.

Capítulo 4

Confiabilidade de Sistemas

4.1 Introdução

Nesse capítulo será desenvolvido o equacionamento para analisar a confiabilidade dos sistemas cuja aplicação deverá ser feita em circuitos de freios pneumáticos. O capítulo será dividido em três partes: definição da nomenclatura geral utilizada em confiabilidade; definição do componente equivalente e, finalmente, a definição do componente reduzido.

O estudo analítico será associado simultaneamente aos resultados obtidos através do programa BRAKEREL. O objetivo é relacionar o desenvolvimento teórico com as saídas dos cálculos oferecidas pelo programa, na forma de gráficos e de tabelas. Essas saídas oferecem possibilidades que, através do programa, permitem analisar a confiabilidade, a não-confiabilidade, a taxa instantânea de falha, e a função densidade de probabilidade de falha para o componente equivalente e para o componente reduzido.

4.2 Definições

4.2.1 Componente

Componente (CO) é definido como o item que tem uma função específica dentro de um arranjo. As funções constituintes da distribuição probabilística de Weibull são:

$$4.1 \quad R_{CO_i} = e^{-(\lambda_{OCO_i} \cdot x)^{\beta_{CO_i}}}$$

$$4.2 \quad F_{CO_i} = 1 - e^{-(\lambda_{OCO_i} \cdot x)^{\beta_{CO_i}}}$$

$$4.3 \quad \lambda_{CO_i} = \beta_{CO_i} (\lambda_{OCO_i})^{\beta_{CO_i}} x^{(\beta_{CO_i} - 1)}$$

$$4.4 \quad f_{CO_i} = \lambda_{CO_i} \cdot R_{CO_i}$$

onde

R_{CO_i} = confiabilidade do i-ésimo componente CO_i ;

F_{CO_i} = não-confiabilidade do i-ésimo componente CO_i ;

λ_{CO_i} = taxa de falha instantânea do i-ésimo componente CO_i ;

f_{CO_i} = função densidade de probabilidade (fdp) do componente CO_i ;

λ_{OCO_i} = taxa de falha característica do i-ésimo componente CO_i ;

β_{CO_i} = parâmetro de forma do i-ésimo componente CO_i ;

x = período de vida do componente expressa na unidade de tempo (h), ciclos (n) ou distância percorrida (km).

4.2.2 Sensor

Sensor (SE) é o dispositivo que tem a função de monitorar a condição efetiva de trabalho de um item (componente ou sistema) vinculado a ele e de detectar o estado iminente de falha antes que ela efetivamente ocorra. Pela definição, o sensor é indicado para atuar em itens cujo mecanismo de falha é identificado como paramétrico. Quando está associado a um item, mede uma variável (pressão, temperatura, desgaste, ruído,...) e retorna a informação ao usuário ou para o próprio item, atuando como um elemento de decisão para mudança de “estado” de funcionamento do sistema. O valor limite de cada uma dessas variáveis, normalmente, define a condição de falha que vai requerer a troca ou reparo [76]. O sensor pode ser definido como perfeito ou real.

Sensor perfeito é um sensor ideal, admite-se que ele nunca falha. Evidentemente não existe, mas a sua utilização pode gerar informações relativas à influência do sensor sobre o componente. Desse modo, se mesmo com sensor perfeito a confiabilidade do componente equivalente não satisfaz, significa que só resta agregar tecnologia ou redundância ao item em questão. Para o sensor perfeito foi considerado que a taxa de falha é nula e que o parâmetro de forma é igual à unidade. A confiabilidade, portanto, também será igual a unidade. O sensor real é aquele que tem definido um parâmetro de forma e uma taxa de falha, resultando portanto em confiabilidade menor do que a unidade.

O sensor tem a função de:

- informar a iminência da falha a fim de orientar para a substituição do item que está monitorando;
- interromper o trabalho do item ou itens que ele está monitorando, antes que a falha ocorra;
- substituir o item falho por um bom, automaticamente.

As funções probabilísticas são:

$$4.5 \quad R_{se_i} = e^{-(\lambda_{ose_i} x)^{\beta_{se_i}}}$$

$$4.6 \quad F_{se_i} = 1 - e^{-(\lambda_{ose_i} x)^{\beta_{se_i}}}$$

$$4.7 \quad \lambda_{se_i} = \beta_{se_i} (\lambda_{ose_i})^{\beta_{se_i}} (x)^{(\beta_{se_i} - 1)}$$

$$4.8 \quad f_{se_i} = \lambda_{se_i} R_{se_i}$$

onde

R_{se_i} = confiabilidade do i-ésimo sensor SE_i ;

F_{se_i} = não-confiabilidade do i-ésimo sensor SE_i ;

λ_{se_i} = taxa de falha instantânea do i-ésimo sensor SE_i ;

f_{se_i} = função densidade de probabilidade (fdp) do sensor SE_i ;

λ_{ose_i} = taxa de falha característica do i-ésimo sensor SE_i ;

β_{sci} = parâmetro de forma do i-ésimo sensor SE_i .

x = período de vida do sensor expressa na unidade de tempo (h), ciclos (n) ou quilômetros (km).

4.2.3 Comutador

O comutador (CM) é um dispositivo que viabiliza a substituição do item falho pelo item bom. É usado nos arranjos com redundância paralela passiva. Pode ser definido como real ou perfeito.

É empregado nos casos de ocorrência de falha catastrófica e também em situações em que a falha paramétrica atinge limites que inviabilizam a operacionalidade adequada do item.

4.2.4 Componente equivalente

Componente equivalente (CE) é um novo componente, constituído de um componente (CO) e de um sensor (SE). O componente equivalente pode ser representado pelo arranjo composto de um sensor e um componente, como mostrado na Figura 4. 1. O sensor monitora o componente (CO_A) devendo indicar o estado iminente de falha. A partir daí alguma ação deve ser tomada para proceder a substituição do item (A) por (B), que na prática, pode ou não fazer parte ativa do sistema. Faz-se então a substituição do item em estado de falha. Como a falha, efetivamente, não ocorreu, essa ação de substituição pode ser interpretado, como suspensão, ao invés de falha. Esse modelo é proposto, evidentemente, para itens que apresentam falha paramétrica. Quando a falha for catastrófica, o sensor perde a função.

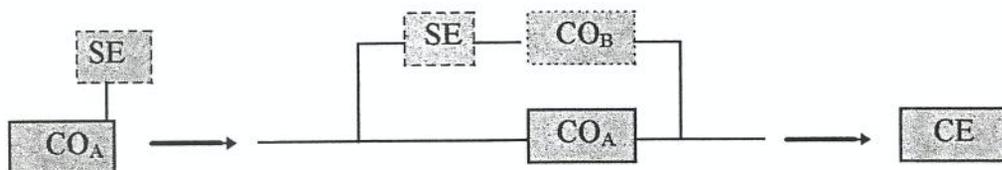


Figura 4. 1 Representação esquemática do componente equivalente [75]

A visualização do modelo da Figura 4. 1 pode ser feita através do exemplo que analisa um reservatório de fluido de freio de um freio hidráulico automotivo, como citado por Pallerosi e Paoni[75]. O item (A) é o reservatório de fluido de freio que trabalha cheio. O sensor (SE) é o detector do nível de óleo. Quando baixa o nível de óleo, o sensor acusa falha do componente (A). O item (A), então, deve ser substituído pelo item redundante (B), ou seja, pelo reservatório cheio. Na prática o item (B) significa completar o nível de óleo de freio. Assim, o reservatório volta à condição de operação (“good as new”) sem que a falha tenha se caracterizado.

O componente equivalente não existe efetivamente. Ele é na verdade uma composição entre um componente e um sensor. As funções probabilísticas para o componente equivalente são, por conseguinte, dependentes dos componentes ativo (CO_A), do reserva (CO_B), e do sensor (SE). Então a taxa de falha e o parâmetro de forma não são determinados na prática. São obtidos através de relações analíticas dos dados dos componentes e do sensor que o constitui.

4.3 Confiabilidade do componente equivalente

4.3.1 Equação geral

A equação geral da confiabilidade para o componente equivalente (CE), como está representada na (Figura 4. 1), considerando o componente (CO_A) diferente do componente (CO_B), é dada por [75] como:

$$4.9 \quad R_{cei} = e^{-(\lambda_{oco_a} x_i)^{\beta_{coa}}} + \left[\frac{(\lambda_{oco_a} x_i)^{\beta_{coa}}}{(\lambda_{oco_a} x_i)^{\beta_{coa}} - (\lambda_{ocob} x_i)^{\beta_{cob}}} \right] \left[e^{-(\lambda_{ocob} x_i)^{\beta_{cob}}} - e^{-(\lambda_{oco_a} x_i)^{\beta_{coa}}} \right] \left(e^{-(\lambda_{ose} x_i)^{\beta_{se}}} \right)$$

a não-confiabilidade é

$$4.10 \quad F_{cei} = 1 - R_{cei}$$

onde

R_{cei} = Confiabilidade do componente equivalente (CE_i);

F_{cei} = Não-confiabilidade do componente equivalente (CE_i);

R_{coa} = Confiabilidade do componente (CO_A);

R_{cob} = Confiabilidade do componente (CO_B);

R_{se} = Confiabilidade do sensor (SE);

λ_{ocoa} = taxa de falha característica do item (A);

λ_{ocob} = taxa de falha característica do item (B);

λ_{ose} = taxa de falha característica do sensor (SE);

β_{coa} = parâmetro de forma do item (A);

β_{cob} = parâmetro de forma do item (B);

β_{se} = parâmetro de forma do sensor (SE);

Observa-se que a segunda parcela da equação 4.9 é influenciada positivamente pelas confiabilidades do item reserva e do sensor. Em muitos casos a confiabilidade do item reserva (B) pode ser diferente da do item que está em operação (A). Essa situação é comum quando é necessário proteger o sistema contra a falha de modo comum. Nas redundâncias passivas e em algumas aplicações de redundância ativa, esse é o procedimento aplicado. O freio de emergência dos circuitos pneumáticos constitui um exemplo desse caso. A atuação do freio de emergência é função da força de mola, enquanto que a do freio de serviço se dá pneumáticamente. Essa situação ocorre também quando o item que está na reserva ativa ou passiva tem alteração da taxa de falha e parâmetro de forma. Ambos os casos, por sua vez, são difíceis de serem definidos, haja vista que podem variar de uma condição para outra.

Em muitos caso é possível admitir que o item (A) seja igual ao item (B). Considera-se, então, que as confiabilidades dos componentes são iguais, $R_a = R_b$. Devido a essa simplificação, ocorre uma indeterminação, dado que $R_a - R_b = 0$. Fazendo o levantamento da indeterminação pela aplicação do limite, obtém-se:

$$4.11 \quad R_{cei}(x) = [e^{-(\lambda_{co_i} x_i)^{\beta_{co_i}}}] \{1 + [(\lambda_{co_i} x_i)^{\beta_{co_i}} (e^{-(\lambda_{se_i} x_i)^{\beta_{se_i}}})^{\beta_{se_i}}]\}$$

ou então

$$4.12 \quad R_{ce_i} = R_{co_i} [1 + (\lambda_{co_i} \cdot x)^{\beta_{co_i}} (R_{se_i})]$$

A não-confiabilidade é

$$4.13 \quad F_{ce_i}(x) = 1 - R_{ce_i}(x)$$

4.3.2 Parâmetros da equação de Weibull para Componente Equivalente.

O parâmetro de forma e a taxa de falha para o componente equivalente são obtidos de maneira semelhante ao que foi feito para o componente. Estando disponíveis essas variáveis, a equação de Weibull para a confiabilidade ou para a não-confiabilidade é

$$4.14 \quad R_{ce_i} = e^{-(\lambda_{ce_i} \cdot x_i)^{\beta_{ce_i}}}$$

$$4.15 \quad F_{ce_i} = 1 - e^{-(\lambda_{ce_i} \cdot x_i)^{\beta_{ce_i}}}$$

Linearizando as equações

$$4.16 \quad \ln R_{ce_i}(x_i) = \ln(1 - F_{ce_i}(x_i)) = -(\lambda_{ce_i} x_i)^{\beta_{ce_i}}$$

$$\ln\{-\ln[R_{ce_i}(x_i)]\} = \beta_{ce_i} \ln \lambda_{ce_i} + \beta_{ce_i} \ln x_i$$

ou,

$$4.17 \quad \ln\{-\ln[1 - F_{ce_i}(x_i)]\} = \beta_{ce_i} \ln \lambda_{ce_i} + \beta_{ce_i} \ln x_i$$

As equações 4. 16 e 4. 17 podem ser reescritas na forma linearizada:

$$4.18 \quad Y_i = C_a X_i + C_l$$

sendo que

$$4.19 \quad Y_i = \ln[-1.\ln(R_{ce_i}(x_i))]$$

onde $R_i(x_i)$ é o valor da confiabilidade do componente equivalente obtido da equação geral [4.9], para cada valor da vida (x_i).

$$4.20 \quad X_i = \ln(x_i)$$

O coeficiente angular C_a corresponde ao parâmetro de forma β_{ce} e será obtido pelo método dos mínimos quadrados [62,91,55]:

$$4.21 \quad \beta_{ce} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

sendo Y_i e X_i , respectivamente, os pontos das ordenadas e das abcissas, e \bar{X} e \bar{Y} , os pontos médios, definidos como:

$$4.22 \quad \bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i$$

e

$$4.23 \quad \bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i$$

onde n é o número de pontos utilizado para traçar os gráficos. Cada gráfico tem no máximo 100 pontos.

A taxa de falha vem diretamente da equação linearizada da confiabilidade:

$$4.24 \quad \lambda_{oce} = e^{\frac{\ln(-\ln(R_{ce}(\bar{X}))) - \beta_{ce} \cdot \ln(\bar{X})}{\beta_{ce}}}$$

ou, simplesmente,

$$4.25 \quad \lambda_{oce} = e^{\frac{(\bar{Y}) - \beta_{ce} \cdot (\bar{X})}{\beta_{ce}}}$$

Assumindo a taxa de falha constante, determina-se a vida característica ou parâmetro de escala do componente equivalente.

$$4.26 \quad \alpha_{oce} = \frac{1}{\lambda_{oce}}$$

4.3.3 Avaliação da precisão dos valores de β_{ce} e λ_{ce}

Como visto anteriormente, os parâmetros da equação de Weibull para o componente equivalente são obtidos a partir da equação geral da confiabilidade [eq. 4.9] que é resultante da composição entre os dados do sensor e do componente. Em função disso o traçado da curva confiabilidade *versus* vida, representado no papel probabilístico de Weibull, não é totalmente linear. Isso, de certa maneira, afeta os dados de saída.

Para minimizar a influência desse desvio, utilizam-se 100 pontos Y_i, X_i para traçar a curva confiabilidade *versus* vida. São considerados os valores de confiabilidade que vão desde 99,9999% até 10%. Com esses pontos e as equações [4. 21] e [4. 24] calculam-se os valores de β_{ce} e λ_{ce} que, quando substituídos na equação probabilística de Weibull para calcular a confiabilidade do componente equivalente [eq 4.5] , devem gerar valores de confiabilidade muito próximos dos obtidos pela equação geral da confiabilidade para o componente equivalente.

A título de ilustração, foram calculados os parâmetros de forma e taxa de falha para um componente equivalente, constituído de um componente com sensor real.

Componente: Taxa de falha: $\lambda_{co} = 200 \times 10^{-6}/h$

Parâmetro de forma: $\beta_{co} = 2.0$

Sensor real: Taxa de falha: $\lambda_{sc} = 100 \times 10^{-6}/h$

Parâmetro de forma: $\beta_{sc} = 2,5$

Período de vida : 1.000h.

Esse problema foi proposto e resolvido por Pallerosi[72], utilizando o programa computacional RAMP (Reliability, Availability, Maintainability Program). Para a vida de

1.000h, o valor exato da confiabilidade, obtida pela equação geral [eq.4.9]: é $R_{ce} = 99,9100$.

Os outros resultados são:

- parâmetro de forma para o componente equivalente: $\beta_{se} = 3,893$;
- taxa de falha para o componente equivalente: $\lambda_{se} = 157,173 \times 10^{-6}/h$;

Substituindo esses parâmetros na equação de Weibull [eq. 4.14] para $x = 1.000h$, foi obtido um valor de confiabilidade de $R_{ce} = 99,9256$.

O mesmo problema foi resolvido utilizando o programa BRAKEREL. Na tabela 4.1 tem-se os primeiros resultados. Foi calculada a taxa de falha, o parâmetro de forma, a confiabilidade, a não-confiabilidade, a taxa instantânea de falha e a função densidade de probabilidade de falha para o componente equivalente. Observa-se que os valores da confiabilidade e da não-confiabilidade são assumidos como exatos, dado que são calculados diretamente da equação geral [eq. 4.14]. Os resultados são:

Tabela 4. 1 Valores de β_{ce} e λ_{ce} , R_{ce} , F_{ce} , tif_{ce} e fdp_{ce} para componente com sensor real.

Dados do componente, sensor e componente equivalente

Dados do Componente
 Código: PROBLEMA1 Descrição: CALCULO DO COMPONENTE EQUIVALENTE
 Taxa de Falha: 200 $\times 10^{-6} /h$
 Parâmetro de Forma: 2 Período: 1000 Horas

Dados do Sensor
 Código: SENSOR1 Descrição: SENSOR DO PROBLEMA 1
 Taxa de Falha: 100 $\times 10^{-6} /h$ Parâmetro de Forma: 2.5

COMPONENTE COM SENSOR REAL
 Taxa de Falha Equivalente: 175,801 $\times 10^{-6} /h$ Parâmetro de Forma Equivalente: 4.03

Tabela de Cálculo para o Componente Equivalente

Horas	R	F	tif	fdp
10	0,9999999	0,0000001	3,13 E-12	3,13 E-12
50	0,9999999	0,0000001	4,13 E-10	4,13 E-10
100	0,9999999	0,0000001	3,38 E-9	3,38 E-9
500	0,9999448	0,0000552	4,45 E-7	4,45 E-7
1000	0,9990997	0,0009003	3,64 E-6	3,64 E-6
5000	0,6761502	0,3238498	4,79 E-4	3,24 E-4

Buttons: Sensor, Componente Equivalente, Componente, Retornar

- Valor exato da confiabilidade do componente equivalente obtido da equação 4.14, para a vida de 1000h, é $R_{ce} = 99,90997$

- parâmetro de forma para o componente equivalente: $\beta_{se} = 4,03$;
- taxa de falha para o componente equivalente: $\lambda_{se} = 175,801 \times 10^{-6}/h$;

Para verificar a consistência dos valores de β_{ce} e λ_{ce} , substituíram-se esses mesmos parâmetros na função probabilística de Weibull. Calculou-se, através do programa BRAKEREL, a confiabilidade R_{ce} , a não-confiabilidade F_{ce} , a taxa instantânea de falha tif_{ce} e a função densidade de probabilidade de falha fdp_{ce} . A confiabilidade do componente equivalente, pela equação de Weibull, com taxa de falha equivalente de $175,801 \times 10^{-6}$ (falhas por hora) e parâmetro de forma equivalente de 4,03 para a vida $x = 1.000h$, é $R_{ce} = 99,90938$ (tabela 4.2).

Tabela 4.2 Valores de β_{ce} e λ_{ce} , R_{ce} , F_{ce} , tif_{ce} e fdp_{ce} para componente sem sensor.

Dados do Componente
 Código: PROBLEMA1 Descrição: CALCULO DO COMPONENTE EQUIVALENTE
 Taxa de Falha: 175.801 $\times 10^{-6}$ /h
 Parâmetro de Forma: 4.03 Período: 1000 Horas

Dados do Sensor
 Código: Descrição:
 Taxa de Falha: $\times 10^{-6}$ /h Parâmetro de Forma:

COMPONENTE SEM SENSOR
 Taxa de Falha Equivalente: $\times 10^{-6}$ /h Parâmetro de Forma Equivalente:

Tabela de Cálculo para o Componente

Horas	R	F	tif	fdp
10	0,9999999	0,0000001	3,18 E-12	3,18 E-12
50	0,9999999	0,0000001	4,17 E-10	4,17 E-10
100	0,9999999	0,0000001	3,41 E-9	3,41 E-9
500	0,9999445	0,0000555	4,47 E-7	4,47 E-7
1000	0,9990938	0,0009062	3,65 E-6	3,65 E-6
5000	0,5517377	0,4482623	4,79 E-4	2,64 E-4

Componente Retornar

A variação percentual entre o valor exato e o valor calculado pelo RAMP, considerando a vida de 1.000h, é 0,015611%. Repetindo o cálculo considerando os resultados obtidos pelo programa BRAKEREL, para a mesma vida (1000h), obtém-se a variação percentual de 0,000590535%. Esses resultados indicam que as equações proporcionam um bom ajuste das curvas, o que por sua vez, gera valores de confiabilidade razoavelmente precisos.

A comparação entre os resultados considerados exatos e os obtidos através da taxa de falha e parâmetro de forma, calculados pelo programa RAMP e BRAKEREL, estão representados na Figura 4. 2. A figura mostra que ambos os programas geram distribuições muito próximas da curva exata.

No programa BRAKEREL, o valor do parâmetro de forma e da taxa de falha do componente equivalente sofre pequena variação à medida que muda o período a ser analisado. Isso ocorre porque mais pontos são utilizados para calcular os parâmetros. Essas pequenas variações, no entanto, são para ajustar a distribuição àquele período específico. Para valores de confiabilidade menores de 50%, a diferença entre os valores exatos e os calculados pelo programa BRAKEREL aumenta.

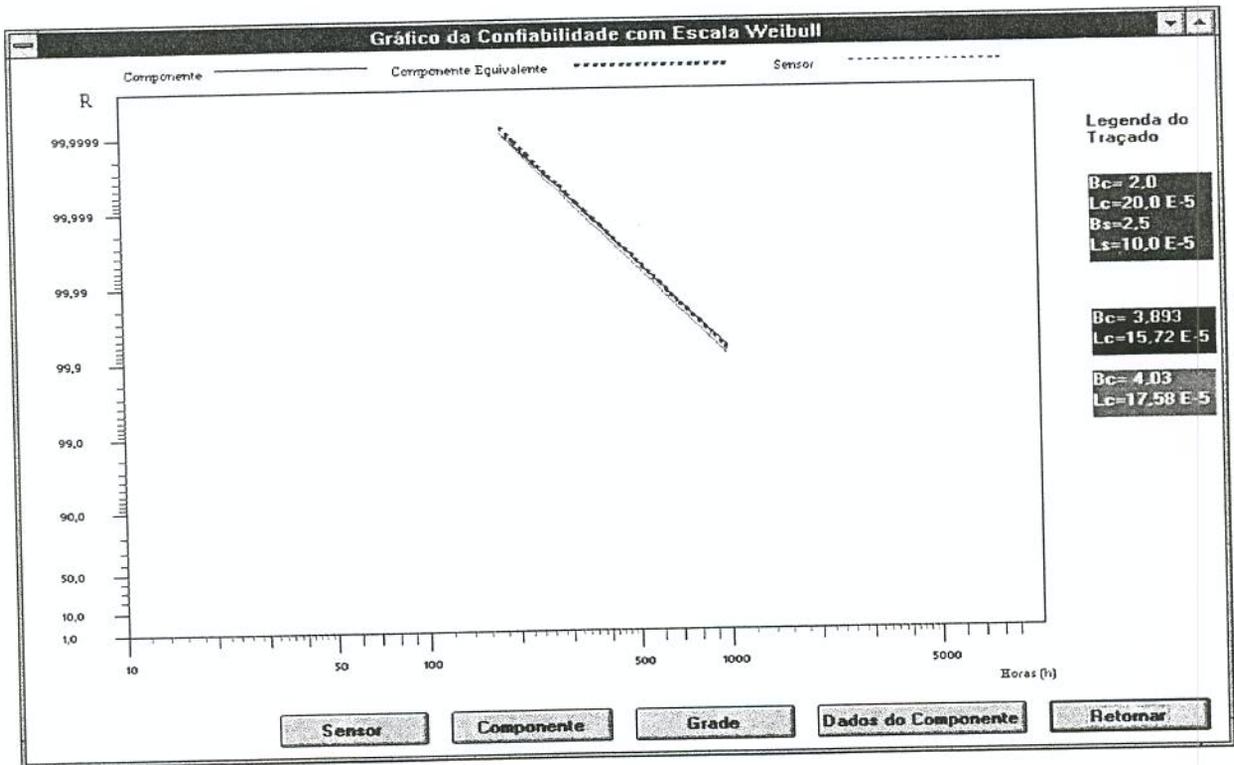


Figura 4. 2 Gráfico da confiabilidade na escala de Weibull comparando a curva exata (azul) com a obtida através de β_{ce} e λ_{ce} via RAMP(preto) e BRAKEREL(rosa).

4.4 Influência do sensor sobre a confiabilidade

Como visto anteriormente o sensor influencia a confiabilidade do componente equivalente. Nesse item pretende-se demonstrar essa influência, variando as características do

sensor e mantendo constante as do componente sem o sensor. Utiliza-se o programa BRAKEREL para calcular todas as variáveis confiabilísticas relativas ao componente, sensor e componente equivalente.

4.4.1 Caso 1: Componente sem sensor

A ausência do sensor é caracterizada pela suposição de que a taxa de falha é muito grande, $\lambda_{sc} \rightarrow \infty$ e o parâmetro de forma $\beta_{sc} = 1$. A confiabilidade do sensor, nessa condição, tende para zero ($R_{se} \rightarrow 0$). A

Figura 4. 3 mostra a representação esquemática de um componente sem sensor. O componente equivalente, então, é o próprio componente A. Os dados do componente são:

- taxa de falha $\lambda_{co} = 15 \times 10^{-6}/\text{km}$;
- parâmetro de forma $\beta_{co} = 1,5$



Figura 4. 3 Representação esquemática de um componente sem sensor

Tabela 4. 3 Dados de saída para o componente sem sensor, na escala linear.

Dados do componente, sensor e componente equivalente					
Dados do Componente					
Código:	CASO1		Descrição: COMPONENTE SEM SENSOR		
Taxa de Falha:	15	$\times 10^{-6} / \text{km}$			
Parâmetro de Forma:	1.5	Período:	100000	Kilômetros	
Dados do Sensor					
Código:	Descrição:				
Taxa de Falha:		$\times 10^{-6} / \text{km}$	Parâmetro de Forma:		
COMPONENTE SEM SENSOR					
Taxa de Falha Equivalente:		$\times 10^{-6} / \text{km}$	Parâmetro de Forma Equivalente:		
Tabela de Cálculo para o Componente					
Kilômetros	R	F	tif	fdp	
10000	0,9985307	0,0014693	4,26 E-7	4,26 E-7	+
20000	0,9890846	0,0109154	1,59 E-6	1,57 E-6	
30000	0,9650552	0,0349448	3,44 E-6	3,32 E-6	
40000	0,9213429	0,0786571	5,94 E-6	5,47 E-6	
50000	0,8551528	0,1448472	9,08 E-6	7,76 E-6	
60000	0,7668195	0,2331805	1,28 E-5	9,84 E-6	
70000	0,6602340	0,3397660	1,72 E-5	1,14 E-5	
80000	0,5425390	0,4574610	2,22 E-5	1,20 E-5	+
			Componente		Retornar

Na tabela 4.3 estão os valores da confiabilidade, não-confiabilidade, taxa instantânea de falha e função densidade de probabilidade de falha para o componente.

4.4.2 Caso 2: Componente com sensor real.

Neste caso, serão utilizados os mesmos dados do caso 1, acrescidos das informações do sensor. O desenho esquemático da Figura 4. 4 representa um componente com sensor real. É considerado que o componente reserva é igual ao componente ativo.

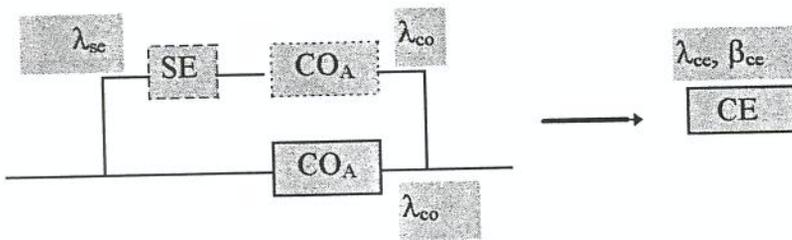


Figura 4. 4 Representação esquemática de um componente equivalente com sensor real.

- taxa de falha do componente $\lambda_{co} = 15 \times 10^{-6}/\text{km}$;
- parâmetro de forma do componente $\beta_{co} = 1,5$;
- taxa de falha do sensor $\lambda_{sc} = 15 \times 10^{-6}/\text{km}$;
- parâmetro de forma do sensor $\beta_{sc} = 2,5$.

Na tabela 4.4 estão os valores da confiabilidade, não-confiabilidade, taxa instantânea de falha e função densidade de probabilidade de falha para o sensor. Na tabela 4.5 estão os valores para o componente equivalente. Considerando o sensor real obteve-se, para o componente equivalente, um parâmetro de forma de 3,05 e uma taxa de falha de $13,042 \times 10^{-6}$ [falhas por km]. Então, o sensor gerou um componente equivalente com taxa de falha menor e parâmetro de forma maior.

Tabela 4. 4 Dados de saída para o sensor, na escala linear.

Dados do componente, sensor e componente equivalente

Dados do Componente
 Código: CASO 2 Descrição: COMPONENTE COM SENSOR REAL
 Taxa de Falha: 15 $\times 10^{-6}$ /km
 Parâmetro de Forma: 1.5 Período: 100000 Kilômetros

Dados do Sensor
 Código: SENSOR 2 Descrição: SENSOR DO CASO 2
 Taxa de Falha: 15 $\times 10^{-6}$ /km Parâmetro de Forma: 2.5

COMPONENTE COM SENSOR REAL
 Taxa de Falha Equivalente: 13,042 $\times 10^{-6}$ /km Parâmetro de Forma Equivalente: 3,05

Tabela de Cálculo para o Sensor

Kilômetros	R	F	tif	fdp
10000	0,9913236	0,0086764	2,18 E-6	2,16 E-6
20000	0,9519002	0,0480998	6,16 E-6	5,87 E-6
30000	0,8729813	0,1270187	1,13 E-5	9,88 E-6
40000	0,7566498	0,2433502	1,74 E-5	1,32 E-5
50000	0,6143815	0,3856185	2,44 E-5	1,50 E-5
60000	0,4637390	0,5362610	3,20 E-5	1,48 E-5
70000	0,3231217	0,6768783	4,03 E-5	1,30 E-5
80000	0,2065029	0,7934971	4,93 E-5	1,02 E-5

Sensor Componente Equivalente Componente Retornar

Tabela 4. 5 Dados de saída para o componente equivalente, na escala linear.

Dados do componente, sensor e componente equivalente

Dados do Componente
 Código: CASO 2 Descrição: COMPONENTE COM SENSOR REAL
 Taxa de Falha: 15 $\times 10^{-6}$ /km
 Parâmetro de Forma: 1.5 Período: 100000 Kilômetros

Dados do Sensor
 Código: SENSOR 2 Descrição: SENSOR DO CASO 2
 Taxa de Falha: 15 $\times 10^{-6}$ /km Parâmetro de Forma: 2.5

COMPONENTE COM SENSOR REAL
 Taxa de Falha Equivalente: 13,042 $\times 10^{-6}$ /km Parâmetro de Forma Equivalente: 3,05

Tabela de Cálculo para o Componente Equivalente

Kilômetros	R	F	tif	fdp
10000	0,9979009	0,0020991	6,14 E-7	6,12 E-7
20000	0,9811856	0,0189144	2,54 E-6	2,49 E-6
30000	0,9342952	0,0657048	5,82 E-6	5,44 E-6
40000	0,8492300	0,1507700	1,05 E-5	8,91 E-6
50000	0,7307208	0,2692792	1,66 E-5	1,21 E-5
60000	0,5943768	0,4056232	2,41 E-5	1,43 E-5
70000	0,4595246	0,5404754	3,30 E-5	1,52 E-5
80000	0,3415121	0,6584879	4,34 E-5	1,48 E-5

Sensor Componente Equivalente Componente Retornar

A Figura 4. 5 mostra função confiabilidade, na escala de Weibull (utilizando o Papel Probabilístico de Weibull - PPW), para o componente (caso 1) representado pela linha contínua, para o sensor e para o componente equivalente (caso 2) representados, respectivamente, pelas linhas pontilhadas fina e grossa. Observa-se que no limite, quando a confiabilidade do sensor tende para zero, a confiabilidade do componente equivalente tende para a confiabilidade do próprio componente, como era de se esperar.

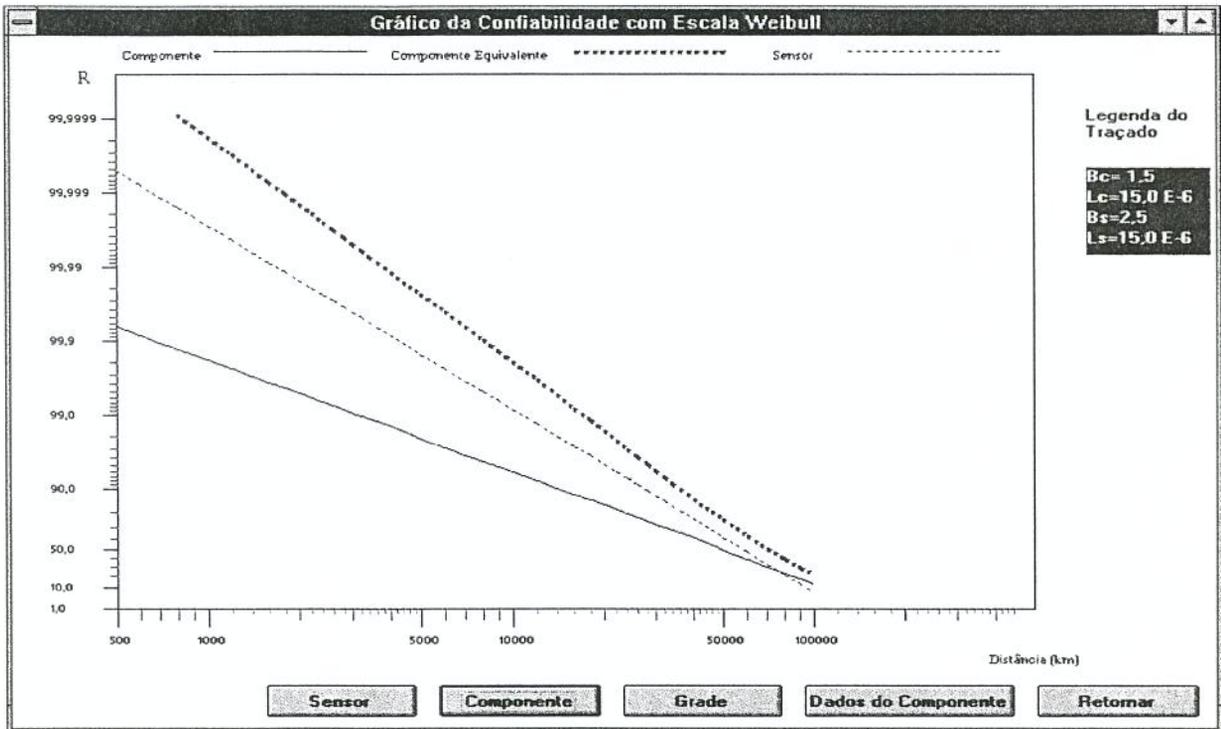


Figura 4. 5 Saída gráfica da confiabilidade na escala de Weibull para o componente, sensor e componente equivalente.

4.4.3 Caso 3: Componente com sensor perfeito

Nesse caso admite-se que o sensor nunca falha, ou seja, $\lambda_{sc} = 0$. Para isso a confiabilidade do sensor será de 100%, independente do valor do parâmetro de forma.

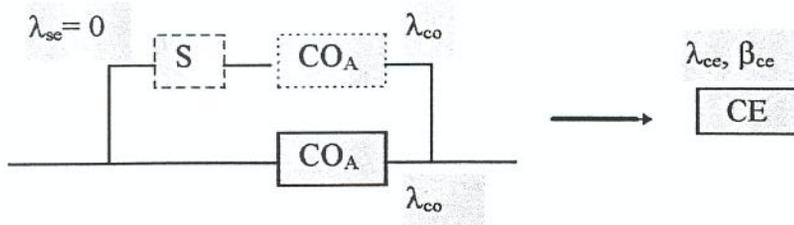


Figura 4. 6 Representação esquemática de um componente equivalente com sensor perfeito.

A equação geral para o componente equivalente [Eq 4.9] pode ser reescrita como:

$$4.27 \quad R_{cei} = e^{-(\lambda_{coi}x)^{\beta_{coi}}} [1 + (\lambda_{coi}x)^{\beta_{coi}}]$$

Na tabela 4.6 estão os valores da confiabilidade, não-confiabilidade, taxa instantânea de falha e função densidade de probabilidade de falha para o componente equivalente com sensor perfeito. Os valores de confiabilidade são ligeiramente melhores do que para o componente com sensor real. Da mesma maneira, com sensor perfeito, a taxa de falha de $10,55 \times 10^{-6}$ é menor do que para o sensor real. O parâmetro de forma de 2,9 ficou um pouco abaixo do parâmetro de forma com sensor real. Isso ocorre devido à influência do valor do parâmetro de forma do sensor real sobre o componente.

Tabela 4. 6 Dados de saída na escala linear para componente equivalente com sensor perfeito.

Dados do componente, sensor e componente equivalente				
Dados do Componente				
Código:	CASO R	Descrição:	COMPONENTE COM SENSOR PERFEITO	
Taxa de Falha:	15		$x10^{-6}$ /km	
Parâmetro de Forma:	1.5	Período:	100000	Kilômetros
Dados do Sensor				
Código	Descrição:			
Taxa de Falha:	0		$x10^{-6}$ /km	Parâmetro de Forma: 1
COMPONENTE COM SENSOR PERFEITO				
Taxa de Falha Equivalente:	10,55		$x10^{-6}$ /km	Parâmetro de Forma Equivalente: 2.9
Tabela de Cálculo para o Componente Equivalente				
Kilômetros	R	F	tif	fdp
10000	0,9983765	0,0016235	4,23 E-7	4,23 E-7
20000	0,9878916	0,0121084	1,58 E-6	1,56 E-6
30000	0,9626474	0,0373526	3,43 E-6	3,30 E-6
40000	0,9202886	0,0797114	5,93 E-6	5,46 E-6
50000	0,8615387	0,1384613	9,07 E-6	7,81 E-6
60000	0,7893312	0,2106688	1,28 E-5	1,01 E-5
70000	0,7078517	0,2921483	1,72 E-5	1,22 E-5
80000	0,6216825	0,3783175	2,22 E-5	1,38 E-5

A figura 4.7 sintetiza a função confiabilidade, na escala linear, para os três casos estudados. O componente sem sensor é representado pela linha azul. O componente com sensor real está representado pela linha preta e o com sensor perfeito, pela linha rosa.

O componente equivalente com sensor perfeito (linha rosa) tem a distribuição da confiabilidade em relação à vida mais adequada. A taxa de falha do sensor perfeito foi admitida zero o que proporciona confiabilidade igual à unidade, independente do parâmetro de forma.

Pela Figura 4. 7 é possível concluir que a associação do sensor ao componente melhora a confiabilidade do conjunto. No entanto, só o sensor, mesmo que seja perfeito, não compensa os problemas de componentes com taxas de falha elevadas, para a função que vão desempenhar.

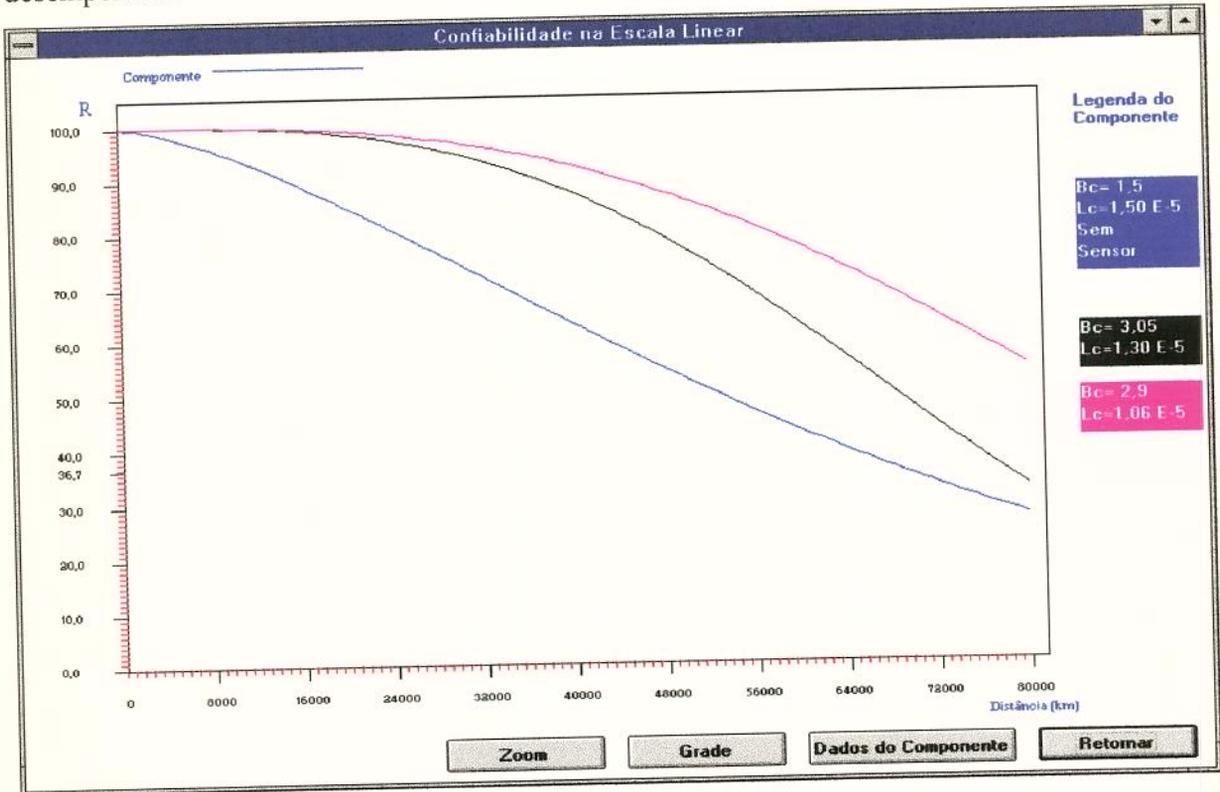


Figura 4. 7 Representação gráfica na escala linear do componente sem sensor (azul), com sensor real (preto) e com sensor perfeito (rosa).

4.5 Arranjos funcionais

O arranjo funcional é uma maneira de representar um conjunto de itens num sistema, os quais estão agrupados para desempenhar uma função específica. Do ponto de vista da confiabilidade, o arranjo pode ser concebido em função do fluxo de energia ou da seqüência de operações requeridas para executar um processo de fabricação. Há casos em que o arranjo é função da seqüência mais provável de decisões que devem ser tomadas pelo próprio equipamento, dada a sua especificidade. Pode ser do tipo série, do tipo paralelo com

redundância ativa, ou paralelo com redundância passiva ou compostos. Existem ainda outros tipos de arranjos, mas não serão considerados neste trabalho. É a partir desses arranjos que se processam as sucessivas composições dos itens constitutivos do sistema geral em componentes reduzidos (CR) até que, finalmente, todo o sistema geral seja transformado num deles. Admite-se que os arranjos sejam formados só de componentes equivalentes. Assim, um componente sem sensor é um componente equivalente (CE), cujo sensor tem taxa de falha infinita e parâmetro de forma igual à unidade, ou seja, a confiabilidade desse sensor é nula.

Para analisar o modelo confiabilístico representativo do sistema real, deve-se ordená-lo em arranjos reduzidos conhecidos. Em muitos desses casos as equações matemáticas já estão disponíveis, principalmente, para arranjos formados de itens semelhantes [56,33,20,24,71]. Também são freqüentes na literatura as equações gerais para solução de arranjos, série ou paralelo, quando a função confiabilidade é expressa na forma da distribuição exponencial [56,76,33,20,64].

Para arranjos constituídos de itens com taxa de falha e parâmetro de forma específico, as soluções são mais complexas e, na maioria das vezes, particulares, ou seja, há uma equação para cada caso. A distribuição de Weibull é nesses casos mais recomendada, contudo, mais complexa de ser usada.

A formulação matemática para o cálculo da confiabilidade dos arranjos funcionais fundamenta-se nos teoremas básicos das probabilidade condicionais, normalmente, chamado de teorema de Bayes[62,91,20]. Admite-se, também, que os eventos sejam independentes e mutuamente exclusivos, isto é, a falha de um item não interfere na falha do outro.

4.5.1 Definição de componente reduzido

Componente reduzido (CR) é o componente resultante da composição de dois ou mais itens arranjados em série, paralelo ativo ou passivo, ou composto. Os arranjos compostos são a combinação de arranjos em série ou em paralelo, ou então, arranjos que representem funções específicas. Na prática os componentes reduzidos resultantes desses arranjos devem representar, sempre que possível, funções, conjunto de funções ou subsistemas que constituem o sistema geral. Através dessa sistemática propõe-se determinar a confiabilidade (R_{CR}), a não-confiabilidade (F_{CR}), a taxa instantânea de falha (tif_{CR}) e a função densidade de probabilidade

de falha ($f_{dp_{CR}}$) para cada subdivisão do sistema e para o próprio sistema de freio pneumático automotivo.

4.5.2 Arranjo em série

O arranjo série é aquele que exige o funcionamento simultâneo de todos os itens. A confiabilidade desse arranjo depende, então, da confiabilidade de cada um dos componentes e matematicamente é expressa pelo produto das confiabilidades de cada item que compõe o sistema.

É recomendado para proteger contra a falha por fechamento, haja vista que o sistema só falhará quando todos os sensores ou componentes estiverem fechados. (Então os sensores ou os componentes, nesse arranjo, devem trabalhar abertos, e se pelo menos um dentre eles assim estiver, mantém-se interrompida a conexão)[71]

Modelo confiabilístico



Figura 4. 8 Representação esquemática do arranjo série.

Modelo matemático

$$4. 28 \quad R_{CR_i} = \prod_{i=1}^n e^{-(\lambda_{o_{ce_i}} x_i)^{\beta_{ce_i}}}$$

onde $R_{CR(i)}$ é confiabilidade do componente reduzido do arranjo série para n componentes, com taxas de falha, $\lambda_1(x)$, $\lambda_2(x)$, ..., $\lambda_i(x)$,..., $\lambda_n(x)$, e parâmetros de forma $\beta_1(x)$, $\beta_2(x)$, ..., $\beta_i(x)$, ..., $\beta_n(x)$, normalmente disponível na literatura [56,76,33,20,24,71].

Pode ser representada também pelo produtório das confiabilidades

$$4.29 \quad R_{CR_i} = \prod_{i=1}^n R_{CE_i} = R_{CE_1} \cdot R_{CE_2} \cdots R_{CE_i} \cdots R_{CE_n}$$

e a não-confiabilidade $F_{CR(i)}$,

$$4.30 \quad F_{CR_i} = 1 - \prod_{i=1}^n R_{CE_i}$$

Quando os itens que compõem o arranjo forem iguais,

$$4.31 \quad R_{CR_i} = (R_{CE})^n$$

4.5.3 Arranjo em paralelo com redundância ativa

O arranjo em paralelo constitui-se na associação de itens, de tal modo, que o funcionamento do sistema geral depende do funcionamento de pelo menos k itens, entre os n disponíveis. Com esse arranjo é possível melhorar a confiabilidade do componente reduzido, mesmo combinando itens de confiabilidade baixa.

Redundância ativa significa que todos os itens estão continuamente conectados. Assim o sucesso do sistema é garantido desde que pelo menos k itens sejam “bons”. Quando ocorre falha de um item, o outro assume imediatamente a função, sem interrupção da atividade. Essa condição deve se manter até que os $n-k$ itens que estão na reserva entrem em operação.

O arranjo paralelo é recomendado para proteger o sistema contra a falha aberta. Nesse arranjo recomenda-se que os sensores ou os componentes trabalhem fechados[71]. A falha do sistema ocorre, portanto, quando os k itens mínimos necessários para o funcionamento do sistema não mais estão disponíveis.

4.5.3.1 Redundância ativa com “um” componente bom em “n”

Esse tipo de redundância ativa é também chamada de arranjo paralelo puro ou pleno. Representa a redundância ideal. Esse tipo de redundância não representa a grande maioria dos arranjos confiabilísticos existentes na prática, principalmente, na área de engenharia mecânica[76].

modelo confiabilístico

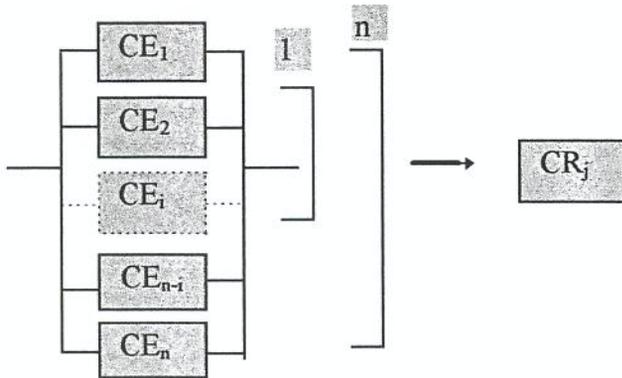


Figura 4. 9 Representação esquemática do arranjo paralelo puro onde CE_i representa o componente equivalente (i) e CR_j o componente reduzido qualquer (j).

modelo matemático

A confiabilidade é obtida por

$$4.32 \quad R_{CR_j} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_{CE_i}) = 1 - [(1 - R_{CE_1})(1 - R_{CE_2}) \dots (1 - R_{CE_n})]$$

e a não confiabilidade

$$4.33 \quad F_{CR_j} = 1 - R_{CR_j}$$

sendo, R_{CRi} confiabilidade do componente reduzido e F_{CRi} não-confiabilidade.

Quando os itens que constituem o arranjo forem iguais, tem-se

$$4.34 \quad R_{CR_j} = 1 - (1 - R_{CE_i})^n$$

$$4.35 \quad F_{CR_j} = 1 - R_{CR_j}$$

4.5.3.2 Redundância ativa com “k” componentes bons em “n”

Esses casos são também conhecidos por arranjos parcialmente redundantes, sistemas do voto da maioria ou sistemas de k bons em n (k out of n). Esses sistemas se situam entre o arranjo em série e o arranjo em paralelo simples, tidos como casos extremos. O primeiro exige que todos os itens funcionem para o sucesso do sistema. Já no segundo caso, totalmente redundante, o sucesso do sistema é garantido, se pelo menos um dos n itens funcionar. No caso parcialmente redundante, o sucesso do sistema é garantido desde que se tenha pelo menos k itens bons, entre os n disponíveis.

Na redundância ativa a falha do item k não é percebida pelo sistema a menos que os itens bons restantes (n - k), sejam menores do que a quantidade de itens mínimos necessários para o funcionamento do sistema.

Modelo confiabilístico

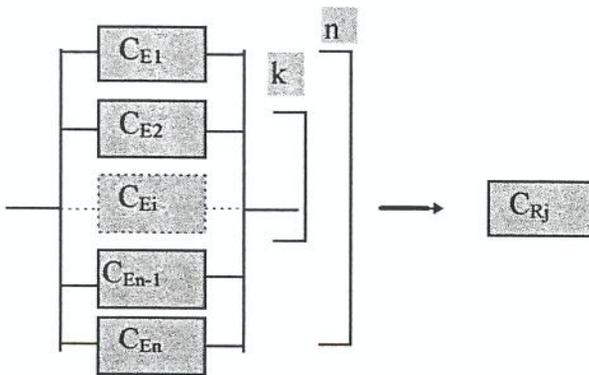


Figura 4. 10 Representação esquemática do arranjo paralelo parcial.

Modelo matemático

CASO 1 - Todos os itens são iguais

A confiabilidade é

$$4.36 \quad R_{CR} = 1 - \sum_{i=1}^k \binom{n}{i-1} R_{CE}^{i-1} (1 - R_{CE})^{n-i+1}$$

onde

$$4.37 \quad \binom{n}{i-1} = \frac{n!}{(i-1)!(n-i+1)!}$$

e R_{CR} é a confiabilidade do arranjo, R_{CE} é a confiabilidade do componente equivalente, n o número de itens no arranjo e k o número de itens necessários para o funcionamento do sistema.

CASO 2 - Os itens são diferentes

As equações para esse tipo de arranjo foram obtidas a partir da teoria das probabilidades condicionais[62,91,20]. Existe uma equação para cada tipo de arranjo. A utilização da distribuição probabilística de Weibull torna as equações com uso ainda mais limitado.

O número de composições que se pode fazer é muito grande. Considerando a área de engenharia mecânica e dentro dela o circuito de freio pneumático, decidiu-se apresentar equações para calcular a confiabilidade de arranjos paralelos ativos parciais, para três composições:

4.5.3.2.1 Arranjo paralelo parcial com 2 itens bons em 3 (k = 2 e n = 3)

4. 38
$$R_{CR} = [(R_{CE1}R_{CE2}R_{CE3}) + (R_{CE1}R_{CE2})(1 - R_{CE3}) + (R_{CE1}R_{CE3})(1 - R_{CE2}) + (R_{CE2}R_{CE3})(1 - R_{CE1})]$$

4.5.3.2.2 Arranjo paralelo parcial com 2 itens bons em 4 (k = 2 e n = 4)

4. 39
$$R_{CR} = \{(R_{CE1}R_{CE2}R_{CE3}R_{CE4}) + [(R_{CE1}R_{CE2}R_{CE3})(1 - R_{CE4}) + (R_{CE1}R_{CE2}R_{CE4})(1 - R_{CE3}) + (R_{CE1}R_{CE3}R_{CE4})(1 - R_{CE2}) + (R_{CE2}R_{CE3}R_{CE4})(1 - R_{CE1})] [(R_{CE1}R_{CE2})(1 - R_{CE3})(1 - R_{CE4}) + (R_{CE1}R_{CE3})(1 - R_{CE2})(1 - R_{CE4}) + (R_{CE1}R_{CE4})(1 - R_{CE2})(1 - R_{CE3}) + (R_{CE2}R_{CE3})(1 - R_{CE1})(1 - R_{CE4}) + (R_{CE2}R_{CE4})(1 - R_{CE1})(1 - R_{CE3}) + (R_{CE3}R_{CE4})(1 - R_{CE1})(1 - R_{CE2})]\}$$

4.5.3.2.3 Arranjo paralelo parcial com 3 itens bons em 4 ($k = 3$ e $n = 4$)

$$4.40 \quad R_{CR} = \{(R_{CE1}R_{CE2}R_{CE3}R_{CE4}) + [(R_{CE1}R_{CE2}R_{CE3})(1 - R_{CE4}) + (R_{CE1}R_{CE2}R_{CE4})(1 - R_{CE3}) + (R_{CE1}R_{CE3}R_{CE4})(1 - R_{CE2}) + (R_{CE2}R_{CE3}R_{CE4})(1 - R_{CE1})]\}$$

A não confiabilidade é para todos os casos

$$4.41 \quad F_{CR} = 1 - R_{CR}$$

4.5.4 Redundância passiva

Redundância passiva, também conhecida com “*standby*”, é uma forma particular de redundância, dentro de um arranjo paralelo, que pode ser comutada num circuito passivo pela ação de um elemento externo. O elemento externo é aqui chamado de comutador. Ele proporciona a atuação do item reserva, “*standby*”. Billinton [20] e Park[76] apresentam várias possibilidades de modelos confiabilísticos e matemáticos para arranjos com redundâncias passivas considerando, porém, a distribuição exponencial como representativa das falhas dos itens.

Neste trabalho, como já comentado, será utilizada a distribuição probabilística de Weibull. Para a composição de arranjos paralelos passivos serão apresentados os modelos confiabilísticos e matemáticos para apenas dois casos: redundância passiva considerando todos os componentes iguais e redundância passiva considerando que o item reserva B tem características confiabilísticas diferentes do item que está na ativa A.

Para os dois casos será considerado também que os itens que estão na reserva e os comutadores não se deterioram nessa condição.

O comutador também pode falhar e por isso também é considerado no cálculo da confiabilidade.

4.5.4.1 Redundância passiva quando todos os itens são iguais

Modelo confiabilístico

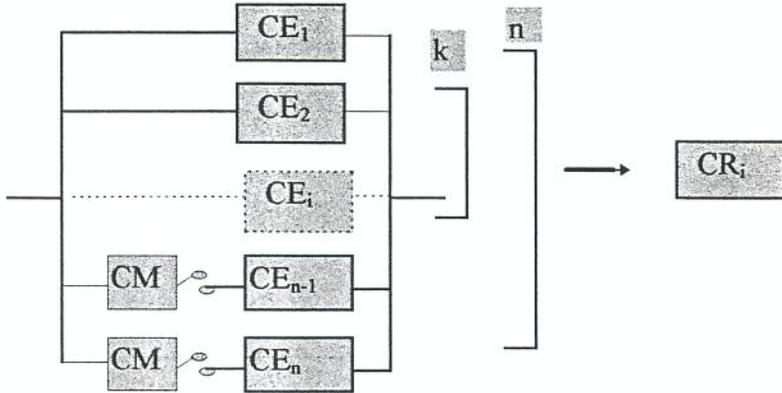


Figura 4. 11 Representação esquemática do arranjo paralelo com redundância passiva.

Modelo matemático

Quando todos os n itens do arranjo são iguais, a confiabilidade do componente reduzido é [67,20,32]:

$$4.42 \quad R_{CR} = R_{ce}^k \left\{ 1 + R_{cm} \left[\sum_{i=1}^{n-k} \frac{k^i}{i!} (\lambda_{ocei} x)^{i\beta} \right] \right\}$$

onde R_{cm} é a confiabilidade do comutador, expressa por

$$4.43 \quad R_{cm} = e^{-(\lambda_{ocm} x)^{\beta_{cm}}}$$

e a não-confiabilidade é dado pela equação 4. 41.

4.5.4.2 Redundância passiva quando todos os itens são diferentes

Nesse caso o item (B), na reserva passiva, é diferente do item (A), que está na em operação, e o comutador pode ser real ou perfeito. Considera-se que tanto o item B como o comutador mantêm a confiabilidade constante enquanto estiverem fora de operação.

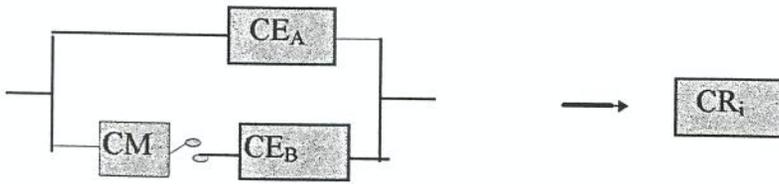


Figura 4. 12 Representação esquemática do arranjo paralelo com redundância passiva $CE_A \neq CE_B$.

A equação da confiabilidade para esse caso é,

$$4.44 \quad R_{cei} = e^{-(\lambda_{ocoa} x_i)^{\beta_{coa}}} + \left[\frac{(\lambda_{ocoa} x_i)^{\beta_{coa}}}{(\lambda_{ocoa} x_i)^{\beta_{coa}} - (\lambda_{ocob} x_i)^{\beta_{cob}}} \right] \begin{bmatrix} e^{-(\lambda_{ocob} x_i)^{\beta_{cob}}} & -e^{-(\lambda_{ocoa} x_i)^{\beta_{coa}}} \end{bmatrix} \left(e^{-(\lambda_{ocm} x_i)^{\beta_{cm}}} \right)$$

4.6 Parâmetros da Equação de Weibull para componentes reduzidos

A determinação dos parâmetros da equação de Weibull para o componente reduzido segue a mesma sistemática já executada para o componente equivalente (Cap.4.3.2). Faz-se a linearização da função da confiabilidade ou não-confiabilidade para a equação de Weibull para o componente reduzido, obtendo-se a taxa de falha e o parâmetro de forma para cada componente reduzido. Essas variáveis são utilizadas para determinar a taxa instantânea de falha (tif_{CR}) e a função densidade de probabilidade de falha (fdp_{CR}). A confiabilidade e a não-confiabilidade do componente reduzido são determinadas a partir das taxas de falha e parâmetro de forma dos componentes, dos sensores ou dos comutadores que fazem parte dos arranjos. Tal sistemática garante que os valores de confiabilidade sejam mais precisos.

Os valores das funções densidade de probabilidade de falha e taxa instantânea de falha terão erros inerentes ao método dos mínimos quadrados, utilizado para obter as taxas de falha e os parâmetros de forma.

4.7 Comentário

Nesse capítulo, definiu-se as equações das funções probabilísticas da distribuição de Weibull para os componentes equivalentes e para os componentes reduzidos. Concomitantemente, foram apresentados os conceitos de componente, sensor, comutador, componente equivalente e componente reduzido.

O componente equivalente é um novo componente, constituído de um sensor que tem a função de detectar o estado iminente de falha do componente que está sensoriando, sinalizando para a sua troca. Essa definição envolve várias considerações, sendo por isso, detalhada sob diversos aspectos. Determinou-se a formulação matemática para se obter os parâmetros da equação de Weibull para o componente equivalente, avaliando ao mesmo tempo os resultados obtidos. Além disso, foi estudada a influência do sensor sobre o componente. Constatou-se que, efetivamente, o componente equivalente tem confiabilidade maior que o componente sem sensor, independente da qualidade do sensor.

O componente reduzido foi definido como um componente síntese de um arranjo resultante de um arranjo em série, em paralelo ativo ou passivo, ou de qualquer outra composição representativa de um caso específico. Construiu-se os modelos confiabilístico e matemático dos arranjos série e paralelo ativo e passivo para calcular a confiabilidade, a não-confiabilidade a taxa instantânea de falha e a função densidade de probabilidade de falha, expressando os resultados na forma de gráficos ou tabelas na escala de Weibull ou na linear.

Capítulo 5

Circuito de freio pneumático

5.1 O sistema de freio

O sistema de freio, ou simplesmente freio, é *um dispositivo utilizado para moderar ou fazer cessar o movimento de mecanismos ou veículos, chamado também de travão ou breque* [18]. A Norma Brasileira NBR 10.966 define o sistema de freio como a *combinação de peças cuja função é reduzir progressivamente a velocidade de um veículo em movimento, ou fazê-lo parar, ou conservá-lo imóvel se já estiver parado*[12].

Sua utilização é tão antiga quanto a roda. Até onde se sabe, o uso da roda para transporte de cargas pesadas data de aproximadamente 4.000AC[36]. Concomitantemente ao emprego da roda era preciso buscar dispositivos que controlassem o movimento das cargas sobre as rodas e as fizessem parar na hora e no local desejado. Apareceram, então, os primeiros problemas de freio.

O conceito de frenagem está associado ao conceito de atrito. Designa o fenômeno provocado pelas forças de adesão existentes entre duas superfícies em contato, com movimentos relativos. Esses conceitos foram aplicados desde os primórdios, mas o controle da ação da frenagem através da aplicação da força, do tamanho das áreas de contato, das características dos materiais atritantes, da alteração de forma e da quantidade de energia que deve ser dissipada, é tarefa dos tempos modernos. Essa tarefa tem requerido e continuará requerendo muito investimento em pesquisa e tecnologia.

À medida que diferentes meios de transporte foram surgindo, o freio foi se diversificando, exigindo o constante aperfeiçoamento dos mecanismos de controle do movimento e de parada. Assim, passaram a ser desenvolvidos freios específicos para serem

aplicados a cada caso particular. Por isso, têm-se hoje freios cuja denominação advém da forma de aplicação ou do tipo de acionamento. Os principais tipos de freios são:

- Mecânico, com acionamento por alavancas. Utilizado em veículos de tração animal, bicicletas, freio de mão de automóveis.
- Eletromagnético, utilizado em guindastes, trens (composições urbanas) e elevadores.
- Hidráulico, amplamente utilizado em automóveis, aviões.
- Hidropneumático, é ainda utilizado em pequenos veículos de carga.
- Pneumático, utilizados em caminhões, ônibus e trens.

5.2 Freios automotivos

O sistema de freio constitui-se em uma das partes mais importantes e vitais dos veículos automotivos. Enquanto um veículo leva muitos segundos para atingir uma razoável velocidade, o sistema de freios tem de reduzir, em tempo muito menor, essa velocidade a zero, ou diminuí-la ao valor desejado. Por outro lado, se os mecanismos encarregados de tracionar o veículo não forem eficientes, as conseqüências estarão relacionadas com o desempenho do veículo. Já no caso dos freios, se isso ocorrer, na melhor das hipóteses haverá o aumento da distância de parada, ou a falta de dirigibilidade do veículo, com conseqüências imprevisíveis.

Na área automotiva, a frenagem é feita basicamente por dois princípios. O primeiro, totalmente mecânico, utiliza a alavanca como multiplicador de força. É usado no freio de mão para automóveis e veículos médios. Para veículos maiores esse multiplicador de força ocorre através de molas helicoidais. O segundo princípio, usado em freios de serviço, é baseado na relação área-pressão. Quando utiliza líquido é chamado de freio hidráulico e quando utiliza ar, é chamado de freio pneumático; quando os dois são combinados, é chamado de freio hidropneumático.

Para veículos menores, automóveis e caminhonetes, onde as pressões de serviço são baixas, os freios são normalmente acionados hidraulicamente. Em veículos médios, ainda são utilizados freios hidropneumáticos. Nos veículos de transporte de carga e nos coletivos são montados sistemas de freios pneumáticos.

Poucas pessoas têm a noção exata ou mesmo parcial do esforço necessário para frear um veículo, principalmente, quando em alta velocidade e com carga. Do ponto de vista da potência, a relação entre aceleração e frenagem pode ser resumida na seguinte comparação: um veículo médio com motor de 100hp, partindo do repouso, gasta vinte segundos para atingir 100km/h. A potência de frenagem requerida para fazer o veículo parar em dois segundos é, aproximadamente, 10 vezes maior, ou seja, 1000hp. Como o tempo de desaceleração tem de ser menor do que o tempo de aceleração tem-se, conseqüentemente, o aumento da potência de frenagem. Além disso, outras variáveis influenciam na potência de frenagem. Por exemplo, o aumento da potência de frenagem é diretamente proporcional ao aumento de peso no veículo. Para a velocidade a relação é quadrática, ou seja, ao aumentar a velocidade aumenta-se ao quadrado a potência requerida para a frenagem do veículo.

A conjunção das três variáveis vai exigir potências de frenagem, muitas vezes superior a estimada para o freio do veículo.

Outra variável importante para os freios é a desaceleração. Ela é um fator de projeto. O nível de desaceleração depende do nível de conforto requerido na frenagem, da segurança de frenagem e dos dispositivos que executam a frenagem. A Norma Brasileira recomenda uma desaceleração média de $5,8 \text{ m/s}^2$ [13,14,17]. Lucchesi[57] afirma que a desaceleração média para freios perfeitamente regulados, em automóveis com carga bem distribuída, com pneus novos e calibrados, em estrada asfaltada, com rugosidade normal, plana e seca, é de 6 m/s^2 para freio a tambor e 7 m/s^2 para freio a disco.

A distância de frenagem ou distância de parada é o outro parâmetro fundamental para a definição de um freio automotivo. Evidentemente ela depende da desaceleração e de todas as variáveis que estão relacionadas à desaceleração. A inércia do sistema de frenagem afeta também a distância de parada.

A desaceleração e a distância de frenagem são as variáveis mais importantes para a caracterização da eficiência do freio. Os testes de avaliação dos sistemas de freio, que são feitos sob recomendações normatizadas, baseiam-se em, pelo menos, uma dessas duas referências. Essas variáveis serão adotadas como referências para construir o modelo confiabilístico. Será admitido que o sistema de freio que não parar o veículo na distância para a qual foi projetado e não produzir a desaceleração recomendada, por norma, está em falha.

5.3 Circuito de freio pneumático

O freio pneumático foi originalmente projetado para composições ferroviárias. Como o ar é fartamente disponível, fácil de ser acumulado, transportado e aplicável a altas pressões, justificou-se seu emprego também no setor automotivo.

O campo de aplicação dos chamados “veículos pesados” é muito diverso. Por isso, a montagem de um circuito de freio depende de um conjunto de fatores que estão vinculados ao tipo de veículo: ônibus ou caminhão e a variáveis, como: uso urbano ou rodoviário, quantidade de carga a ser transportada, uso ou não de carreta, número de eixos, “agressividade” na forma de utilização do veículo, entre outros.

Independentemente da aplicação, os componentes do circuito de freio pneumático desempenham, basicamente, uma das seguintes funções:

1. gerar e acumular o ar;
2. controlar e dirigir o fluxo de ar;
3. aplicar a pressão pneumática.

Todo esse conjunto de equipamentos, aqui chamado de circuito pneumático de freio, tem o objetivo de transmitir e de intermediar a informação comandada pelo motorista para o sistema de atuação mecânica (sapatas, lonas e cubo), que efetivamente proporciona a ação de frenagem (Figura 5. 1).

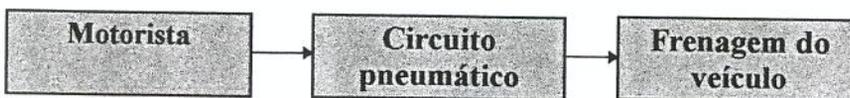


Figura 5. 1 Representação esquemática do comando de frenagem

Além dos componentes de atuação pneumática e mecânica, um circuito de freio é constituído de uma série de itens de comando elétrico que desempenha, basicamente, a função de controle, alerta e sinalização. Por exemplo: atua no controle da válvula solenóide, comunicam-se com o motorista através de sinal sonoro ou luminoso, instalado na cabine, e com o meio externo ao veículo por meio das lanternas de freio.

Dado o avanço da eletrônica em todos os campos do conhecimento, há hoje forte tendência a incorporar componentes eletrônicos aos circuitos. São utilizados no sistema anti-travamento, mais conhecido como ABS (*Antilock Brake System*), cuja função é controlar a força de frenagem, evitando o arraste das rodas no solo. A tendência é utilizar dispositivos eletrônicos para desempenhar a função de controle de fluxo e a de medir a quantidade de energia pneumática a ser liberada em cada aplicação do freio.

Como visto, a quantidade de variáveis para especificar um circuito de freio pneumático é diversa. Além de se considerar os parâmetros relativos ao uso do veículo, há de se contemplar a visão do fabricante das peças que vão compor o circuito de freio e a visão da montadora que fará a montagem.

As Normas Brasileiras que estão em desenvolvimento buscam resolver essas diferenças, principalmente, quanto aos aspectos ligados à segurança veicular. Essas normas são baseadas na ECE-13[34].

5.3.1 Circuito básico do freio pneumático para caminhão ou ônibus

A descrição de um circuito de freio pneumático não é tarefa fácil e é muitas vezes tediosa, em decorrência da quantidade de variáveis e da complexidade que é intrínseca ao sistema. Por isso a descrição do circuito será simplificada, objetivando tão somente contemplar as informações que são importantes para a compreensão da proposta de tese. Em termos gerais, cada modelo de caminhão, ônibus, reboque ou semi-reboque tem um circuito específico de freio pneumático. Em função disso, optou-se trabalhar com um circuito de freio pneumático básico, ou seja, que tenha os itens que fazem parte de qualquer circuito de freio, independente do modelo e do fabricante.

Na Figura 5. 2 é apresentado um circuito de freio pneumático padrão para caminhão ou ônibus com dois eixos, cujos itens estão relacionados na tabela 5.1 [37]. A descrição do funcionamento é baseado no fluxo de energia que, obviamente, assume caminhos diferentes, dependendo da ação dos comandos e dos níveis de pressão exigidos. Os componentes do circuito são identificados por números na Figura 5. 2 e na Figura 5. 3. A esses números foram acrescentadas as letras (CO), de componente, que serão utilizadas nos registros no programa computacional BRAKEREL.

Tabela 5. 1 Relação dos itens do circuito de freio pneumático (figuras 5.2 e 5.3).

ITENS DO CIRCUITO DE FREIO PNEUMÁTICO		
No de ordem	Código de identificação	Nome do componente
1	CO1	Compressor
2	CO2	Regulador de pressão
3	CO3	Válvula protetora de 4 circuitos
4	CO4	Tomada de teste
5	CO5	Reservatório
6	CO6	Válvula de dreno manual
7	CO7	Manômetro
8	CO8	Válvula pedal
9	CO9	Cilindro membrana
10	CO10	Cilindro “tristop”
11	CO11	Válvula solenóide
12	CO12	Cilindro freio motor
13	CO13	auxiliares
14	CO14	Válvula do freio de mão
15	CO15	Válvula relé
16	CO16	Válvula de duas vias
17	CO17	Válvula distribuidora
18	CO18	Válvula de retenção
19	CO19	Válvula freio reboque
20	CO20	Cabeça de acoplamento
21	CO21	Cabeça de acoplamento

O compressor (1) é acionado continuamente pelo motor do veículo, faz a tomada do ar, filtra-o e alimenta o circuito. O ar passa pelo regulador de pressão (2), cuja função é manter a pressão no nível exigido para a plena atividade de frenagem. Sempre que a pressão cair abaixo de 7,5 bar, o regulador conecta o compressor ao circuito e quando a pressão atingir 9,0 bar, libera o ar para a atmosfera.

Por exigência das normas européias ECE-13[34], e será adotado também pelas Normas Brasileiras (NBR), todo o circuito pneumático deve possuir uma válvula protetora de 4

circuitos (3). A válvula de 4 circuitos distribui o ar para o subcircuito I, subcircuito II, subcircuito do freio motor e auxiliares e subcircuito do freio de estacionamento e emergência.

- **Subcircuito I:** É responsável pela frenagem no eixo traseiro. O ar que vem da válvula de 4 vias (3), saída (1), alimenta a tomada de ar externa (4) e o reservatório (5). No reservatório o ar é acumulado sob pressão. O controle da pressão é feito pela válvula reguladora de pressão (2). A válvula de dreno (6), que nesse caso é manual, é usada para fazer a limpeza das impurezas e da umidade que se acumulam no fundo do reservatório.

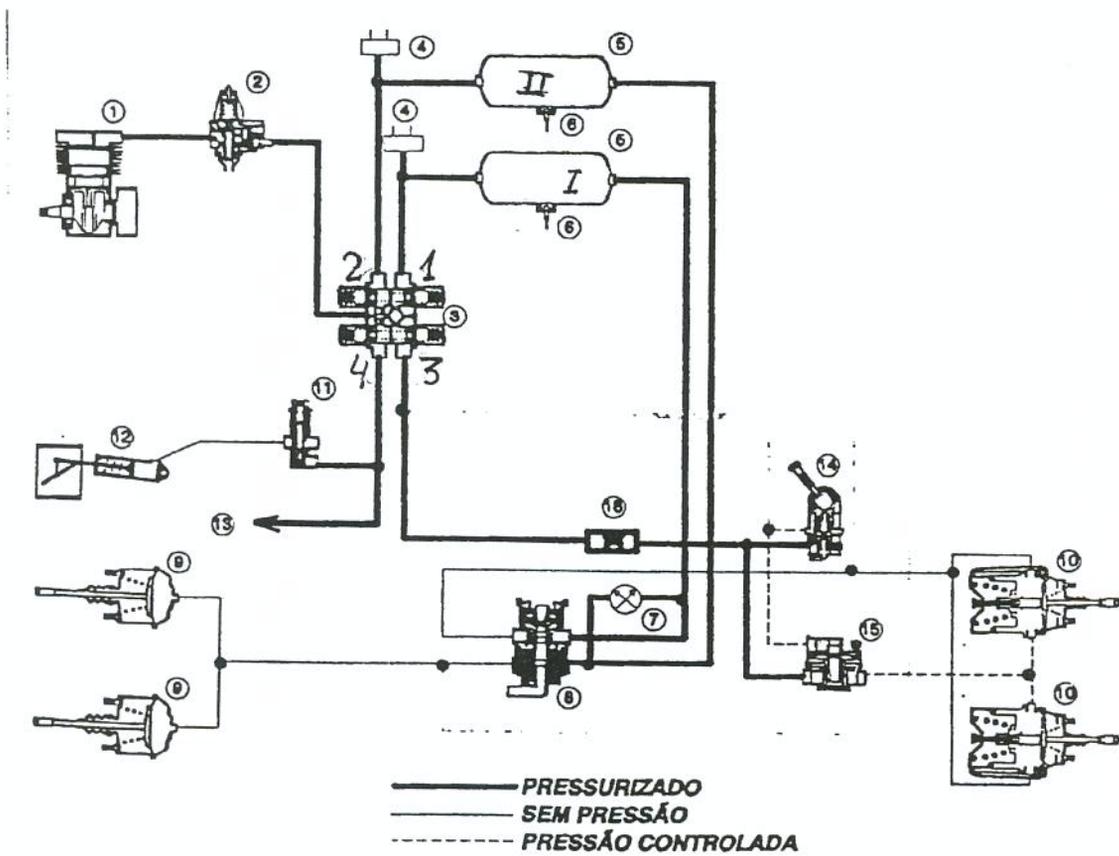


Figura 5. 2 Circuito de freio pneumático para caminhão ou ônibus, com dois eixos. [37]

A pressão pneumática na linha é medida pelo manômetro (7), cuja leitura é feita no painel da cabina do veículo. A parte superior da válvula de pedal (8) controla o fluxo de ar através da câmara pneumática do cilindro combinado (10). Ela transforma a pressão do ar em força, que proporciona a ação de frenagem nas rodas traseiras do veículo, através do sistema de aplicação mecânica do freio, montado no eixo traseiro (Figura 5. 5).

- **Subcircuito II:** É o responsável pela frenagem no eixo dianteiro. O ar vindo da válvula de 4 vias (3), saída (2), faz um caminho similar ao do subcircuito I. Alimenta a outra tomada de ar externa (4) e o outro reservatório (5), onde também está instalada uma válvula de dreno manual (6). A pressão pneumática na linha é igualmente medida pelo manômetro (7). Nesse subcircuito o ar também passa pela válvula de pedal (8), só que aqui, ele passa pelo pórtico inferior da válvula, onde é feito o controle do fluxo de ar que vai atuar na câmara pneumática do cilindro de membrana (9), instalado no eixo dianteiro do veículo. No cilindro de membrana (9) a pressão do ar é transformada em força, que proporciona a ação de frenagem nas rodas dianteiras do veículo, via dispositivo de ação mecânica (Figura 5. 5).
- **Subcircuito do freio de estacionamento e emergência:** A saída (3) da válvula de 4 vias alimenta a válvula do freio de estacionamento (14) que, juntamente com a válvula relé (15), atuam para controlar a pressão na câmara do freio de estacionamento ou câmara do freio de mola(10), do cilindro combinado. O cilindro combinado contém a câmara do freio de mola e a câmara para o freio de serviço. O cilindro combinado é instalado somente no eixo traseiro dos veículos. Quando a câmara do freio de mola está pressurizada, o freio de estacionamento mantém-se liberado. Essa ação comprime a mola helicoidal, colocada na parte posterior do cilindro combinado. A condição de freio de emergência ocorre pela ação controlada e gradual da válvula do freio de estacionamento(14). O ar da câmara de freio de estacionamento é gradualmente liberado para a atmosfera, proporcionando a liberação da mola helicoidal, que desloca o êmbolo da câmara de freio e, através da haste, aciona o freio mecânico.

O subcircuito do freio de estacionamento e o de emergência são os mesmos. A diferença está associada ao instante de aplicação. Quando o freio é aplicado com o veículo em movimento, é chamado de freio de emergência. Nessa condição a aplicação deve ser feita de forma gradativa e controlada. Quando o veículo está parado, ele é chamado de freio de estacionamento. A liberação do ar da câmara do freio de mola, nessa condição, é total.
- **Subcircuito do freio motor e auxiliares:** É o responsável pelo acionamento do dispositivo que bloqueia a saída dos gases de combustão no motor do veículo. O ar, vindo da saída (4) da válvula de 4 vias (3), alimenta a válvula de acionamento (11), que movimenta o pistão (12). Este é responsável pelo corte da alimentação de

combustível da bomba injetora, ao mesmo tempo que restringe a exaustão dos gases da combustão do motor através de uma válvula borboleta. A saída de alimentação externa (13) é usada para movimentar outros dispositivos existentes no veículo.

O freio motor é utilizado, basicamente, para aliviar a carga de frenagem sobre os elementos atritantes. Pode ser caracterizado como um reserva passiva, tendo também o motorista como comutador. Sua função não é parar o veículo, mas sim, quando convenientemente aplicado, diminuir o desgaste dos componentes do circuito aumentando, portanto, a vida desses. Seu uso é intermitente, porque sua eficiência diminui com o tempo, necessitando, por razões construtivas, a sua repetida aplicação e desaplicação.

5.3.2 Circuito básico do freio pneumático para caminhão com saída para o reboque ou semi-reboque

Na Figura 5. 3 tem-se o circuito de freio pneumático idêntico ao da Figura 5. 2, mas agora, com saídas para acoplar o circuito de freio do reboque ou semi-reboque. Ao comparar as duas figuras, observa-se que as partes relativas à geração e ao armazenamento do ar são as mesmas. Foram feitas, porém, derivações dos circuitos já existentes para alimentar o circuito do freio do reboque ou semi-reboque. Nesse caso, o freio de serviço, que é acionado pela válvula de freio de duplo circuito (8), comanda o freio tanto do cavalo mecânico quanto do reboque ou semi-reboque. O freio do reboque ou semi-reboque pode ser acionamento independentemente do freio do cavalo mecânico, através da válvula do freio do reboque (19).

Algumas modificações em relação ao circuito da Figura 5. 2 ocorrem.

- **Subcircuito I:** Até o reservatório I, esse subcircuito é idêntico ao anteriormente apresentado. A válvula de freio de pedal (8) libera o ar armazenado no reservatório I para o eixo traseiro do cavalo mecânico e para o freio de serviço do reboque ou semi-reboque. O ar passa pela válvula de duas vias (16), que está conectada com o primeiro pórtico da válvula distribuidora (17), encarregada de liberar o ar para a frenagem do reboque através da cabeça de acoplamento (21). O freio do reboque pode ser acionado independentemente do freio de serviço do cavalo mecânico. Nesse caso, a ação de frenagem é feita através da válvula manual de freio do reboque (19).

O ar, derivado da saída 3 da válvula de 4 vias, chega à válvula manual (19). Ao ser liberado, passa pela válvula de 2 vias (16) e atinge o primeiro pórtico da válvula relé (17) que, como já foi dito, está conectada à cabeça de acoplamento (21). Existe, ainda, a possibilidade de acionar, ao mesmo tempo, o pedal da válvula de freio (8) e a alavanca da válvula de freio do reboque (19). Nesse caso, o comando da válvula distribuidora (17) será exercido pela linha de maior pressão que chega à válvula de duas vias (16). A frenagem do reboque é feito através da cabeça de acoplamento (21).

- **Subcircuito II:** Até o reservatório II esse subcircuito também é idêntico ao circuito da Figura 5. 2. Do reservatório II o ar, através do pórtico inferior da válvula do freio de pedal(8), se conecta com o circuito de freio do eixo dianteiro do cavalo mecânico e como dos eixos do reboque ou semi-reboque. A ação de frenagem é comandada através do segundo pórtico da válvula distribuidora (17), que libera a passagem do ar para a cabeça de acoplamento (21), usada para alimentação do freio de serviço do reboque. Para essa seqüência de operações, duas observações devem ser feitas. A primeira é relativa à válvula relé(17). Ela possui duas entrada e uma saída de ar. Por isso ela possui um mecanismo, sensível à variação de pressão, semelhante ao da válvula de duas vias (16), que libera a passagem do ar pela via mais pressurizada. A segunda, é relativa à válvula de pedal(8). Quando ela é acionada, o ar é primeiro liberado para o subcircuito do freio traseiro, mas com um diferencial de pressão maior do que para o subcircuito do freio dianteiro. Devido às características construtivas da válvula relé (17), a frenagem do reboque pela válvula de pedal se dará pelo ar comprimido no subcircuito de freio traseiro do cavalo mecânico, já que por esse subcircuito, o ar chega primeiro à válvula relé e, ainda, com maior pressão. A ação de frenagem do reboque via subcircuito de freio dianteiro do cavalo mecânico só será possível caso tenha algum problema no subcircuito traseiro.
- **Subcircuito do freio de estacionamento:** Para o cavalo mecânico, segue a mesma sistemática anteriormente apresentada. Já para o reboque, os freios de estacionamento e de emergência são derivados da saída 3 da válvula de 4 vias. Essa derivação forma a chamada linha de alimentação do reboque cuja conexão é feita pela cabeça de acoplamento (20) do circuito do cavalo mecânico, para armazenar o ar no reservatório do reboque, como pode ser visto na Figura 5. 4. O acionamento do freio de estacionamento, ou de emergência no reboque, é feito pelos mesmos itens de atuação do cavalo mecânico. Esses dispositivos, por intermédio da válvula relé do

cavalo mecânico, atuam sobre a válvula relé e a de emergência instaladas no circuito do reboque ou semi-reboque que gerenciam todas as ações de frenagem comandadas pelo cavalo mecânico.

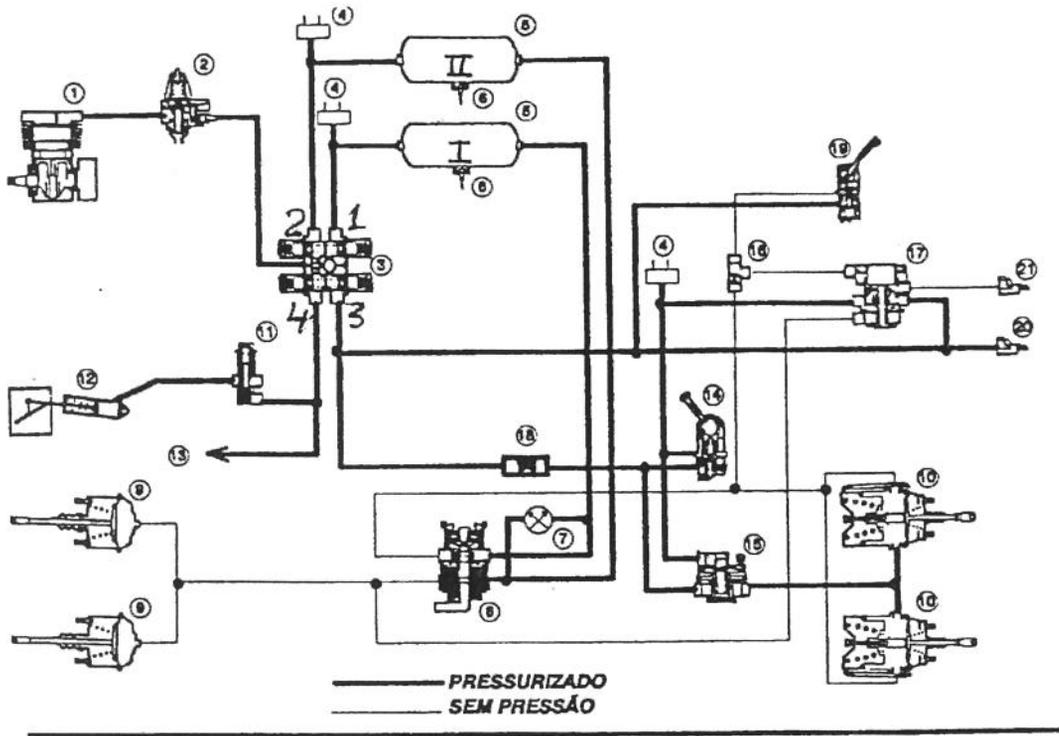


Figura 5. 3 Circuito de freio pneumático do cavalo mecânico com saída para o reboque. [37]

5.3.3 Circuito básico do freio pneumático para o reboque ou semi- reboque.

Reboque é um veículo sem tração própria, que se movimenta quando rebocado por outro. Já o semi-reboque é um reboque sem eixo dianteiro. Ele se movimenta apoiado pelo veículo trator[18].

Os circuitos pneumáticos dos reboques e semi-reboques são, normalmente, muito simples, embora possam ser tão diversos quanto os dos cavalos mecânicos. Constituem-se, basicamente, de duas cabeças de acoplamento, de uma válvula relé-emergência, de válvulas de descarga rápida, de um reservatório e de câmaras de freio instaladas em cada roda dos eixos do semi-reboque (Figura 5. 4).

Evidentemente, devido às suas características, todos os comandos pneumáticos são executados do veículo trator, devidamente preparado para tal, como visto no item anterior.

As cabeças de acoplamento conectam o circuito do veículo trator com o de reboque ou semi-reboque. A válvula relé do reboque, que também atua como emergência, tem um pórtico de entrada de ar com alimentação constante para o reservatório (linha de alimentação) e um pórtico que recebe os sinais da válvula relé (17) (linha de comandos). Esses sinais, se forem do freio de serviço, liberam o ar do reservatório do reboque para as câmaras de freio dos cilindros de membrana, freando as rodas. Essa frenagem pode ocorrer simultaneamente à do cavalo mecânico se for feita via válvula de pedal. Para frenagem exclusiva do reboque ou semi-reboque aciona-se somente a válvula do freio do reboque(19). Para liberação rápida dos freios de serviço é instalada uma válvula de descarga rápida junto a cada eixo do semi-reboque. Os circuitos constituídos somente de cilindros de membrana, como o apresentado na Figura 5. 4, não têm freios de emergência. Nesses circuitos o freio de estacionamento tem atuação única e exclusivamente pneumática. Quando o veículo está parado conecta-se, via válvula relé, o reservatório de ar diretamente às câmaras dos cilindros de membranas. O freio de estacionamento fica dependente, então, da pressão pneumática existente no circuito. Se houver vazamento, o reboque tende a ficar sem freio.

As normas internacionais [ECE 13, ISO..] recomendam a instalação de freio de emergência e freio de estacionamento, independentemente do pneumático, em pelo menos um dos eixos do reboque/semi-reboque. No Brasil, ainda podem ser fabricados reboques e semi-reboques só com cilindros de membrana. A legislação, no entanto, está sendo mudada.

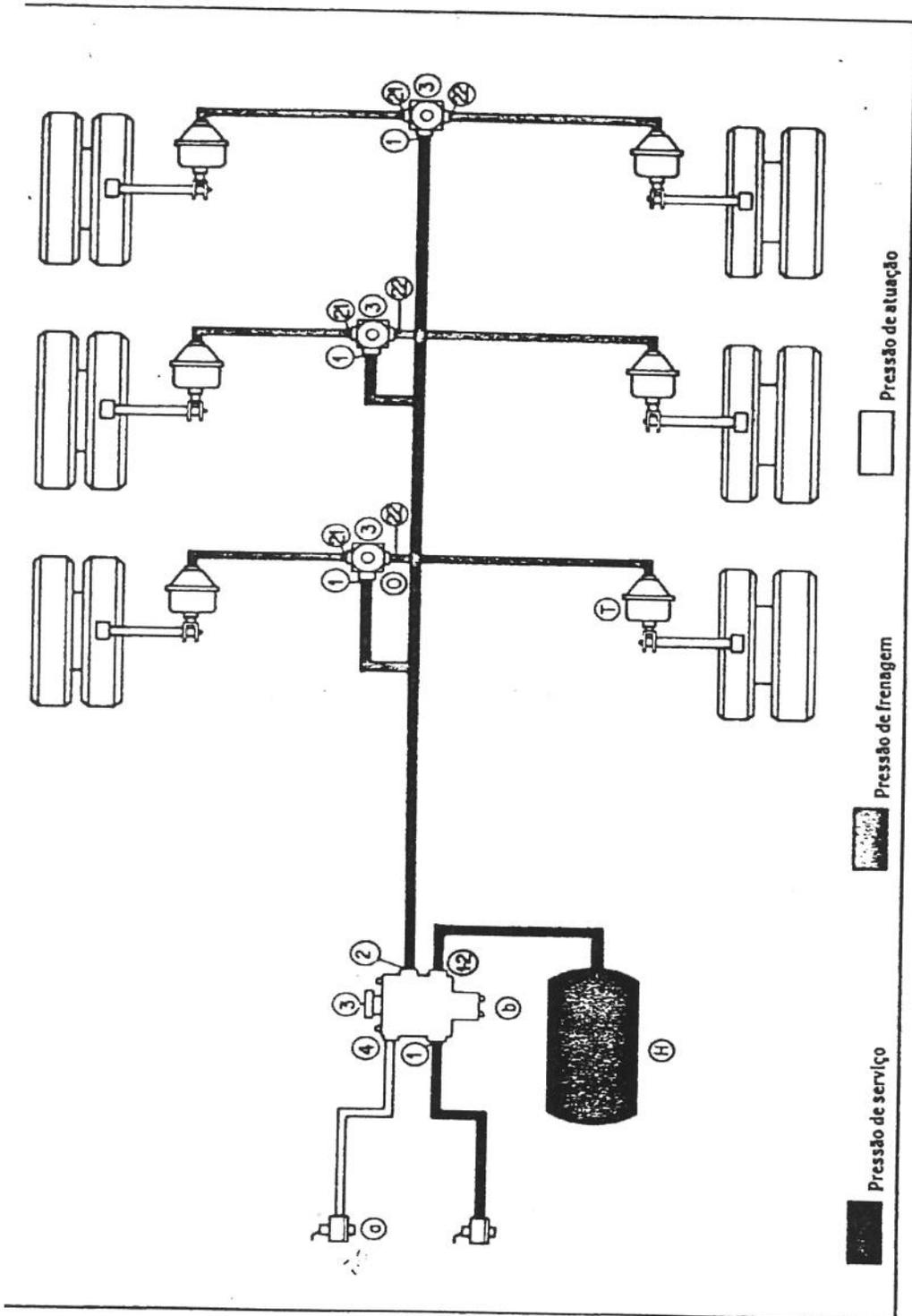


Figura 5. 4 Circuito do freio para reboque/semi-reboque[59]

5.3.4 Dispositivo de frenagem das rodas

O dispositivo de frenagem das rodas é o que efetivamente executa a ação de frenagem proporcionado pelo atrito entre as partes fixas no caminhão e o cubo que gira no eixo. É chamado, normalmente, de freio mecânico (Figura 5. 5). Esse dispositivo é montado em cada roda do caminhão, nos eixos dianteiros e traseiros e no reboque e semi-reboque. Ele transforma a força mecânica transmitida através da haste do cilindro pneumático para a alavanca de ajuste (31), em torque de frenagem. A alavanca de ajuste rotaciona o eixo expensor das sapatas ou eixo-S-came (32), que desloca as sapatas de freio (33) no sentido radial. As guarnições (34), fixadas sobre as sapatas, são comprimidas contra o cubo de roda, efetuando a frenagem propriamente dita. Embora haja duplicação dos componentes, ela não pode ser assumida como redundância, já que todos os itens devem operar contínua e simultaneamente para que o freio funcione na sua plenitude.

Do ponto de vista construtivo, não existem diferenças entre os dispositivos utilizados nos eixos dianteiros e nos traseiros. Como os eixos traseiros recebem mais cargas e possuem dois pneus em cada ponta, são também mais solicitados quando ocorre a frenagem. Por isso eles devem ser mais reforçados do que os dianteiros. Da mesma forma não influencia o fato de o eixo traseiro ser o responsável pelo freio de estacionamento. Esse fato é significativo apenas para a seleção do cilindro pneumático.

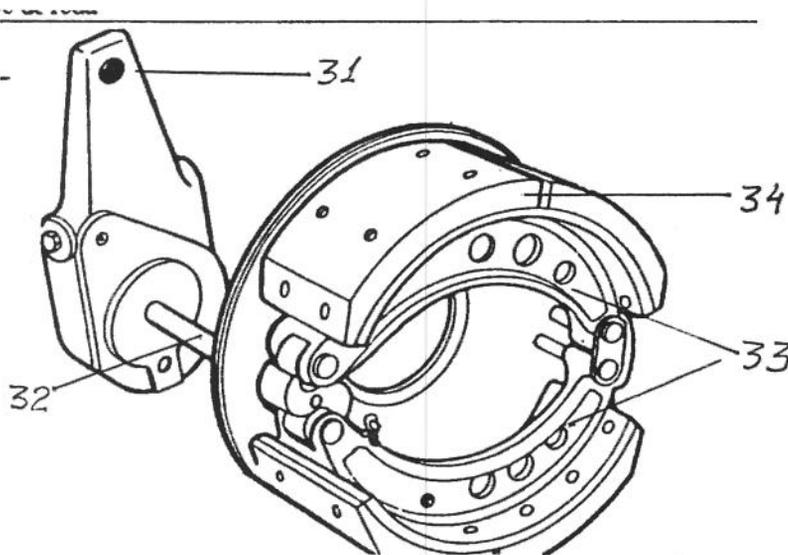


Figura 5. 5 Dispositivo para a ação de frenagem mecânica

Tabela 5. 2 Itens do freio de sapatas (Figura 5. 5).

ITENS DO FREIO DE SAPATAS		
Nº de ordem	Código de identificação	Nome do componente
1	CO31	Alavanca de ajuste do freio
2	CO32	Eixo expensor das sapatas
3	CO33	Sapata de freio
4	CO34	Guarnição de freio
5	CO35	Cubo de roda

5.4 Normas de freio pneumático

Existe um elenco de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, que estabelecem procedimentos e métodos de ensaio[12,13,14,15,16,17,18] para freios de veículos rodoviários. Essas normas são baseadas em normas internacionais, sendo as principais referências, as normas editadas pela Comunidade Econômica Européia - ECE 13 [34] e ISO [50].

As normas definem a função de cada freio utilizado nos veículos e os procedimentos de ensaio. A seguir serão reproduzidos essas funções e as principais características desses freios. Esses procedimentos serão fundamentais para análise da confiabilidade dos freios pneumáticos.

- 1. Freio de Serviço** - *Deve possibilitar a diminuição progressiva da velocidade do veículo e fazê-lo parar de forma segura, rápida e eficaz, qualquer que seja a velocidade e carga, em pista ascendente ou descendente*[12]. *Para frenagem com ambos os freios, a distância de parada deve ser calculada levando em consideração uma desaceleração em média $5,8 \text{ m/s}^2$. Essa distância sofre pequenas variações em função do tempo de reação do sistema*[13]. Nessas condições a pressão pneumática nos circuitos deve ser pelo menos de 7,5 bar.
- 2. Freio de Emergência** - *Deve possibilitar a parada do veículo em uma distância razoável, no caso de falha do freio de serviço. Dever ser possível graduar esta ação de frenagem.* Para os veículos que usam freio pneumático, a desaceleração recomendada é em média $2,2 \text{ m/s}^2$ [12,13].

3. **Freio retardador** - É um sistema cuja função é *estabilizar a velocidade em descidas longas sem utilizar os sistemas de freio de serviço, de emergência ou de estacionamento, nem o efeito frenante do motor; tem também a função de contribuir para essa estabilização com o auxílio dos freios mencionados* [12]. O freio motor tem a mesma função de retardar o veículo em longos trechos. Ele não tem, contudo, ação contínua. Em longas distâncias precisa ser acionado e desacionado.
4. **Freio de estacionamento** - *Deve manter o veículo parado em uma pista ascendente ou descendente, com inclinação de 20% só para o caminhão, e de 12%, se existir um reboque acoplado. Os elementos que mantêm essa ação de frenagem devem ser puramente mecânicos.*[12,13].

A norma de sistema de freio para veículos rodoviários - ensaio de desempenho - [13], fixa as condições gerais para execução dos ensaios. Coloca que o desempenho de um sistema de freio é determinado em função *da distância de parada em relação à velocidade inicial*, ou ainda, *pelo tempo de reação do sistema e da desaceleração média*, em operação normal. *A norma define que a distância de parada é a distância coberta pelo veículo a partir do instante em que o condutor começa a acionar o controle do sistema de freio até a parada do veículo.*

As variáveis que foram consideradas determinantes da condição de falha são a desaceleração ou a distância de parada. São prescritas na norma NBR 10.967[13] como referências para avaliação do freio de serviço de veículos com freios pneumáticos em perfeitas condições. A pressão deve estar dentro da faixa de 7,5 bar a 9,0 bar.

Para este trabalho, a árvore de falha será montada considerando que o freio está dentro das prescrições da norma. Se a pressão estiver abaixo do normatizado, será admitido que o freio está em falha. Salienta-se que essa é uma condição de falha paramétrica. Isso que dizer que não há perda total do freio do veículo. Contudo, ele não vai mais parar na distância de parada previamente estabelecida e nem com a desaceleração recomendada.

5.5 Comentário

A complexidade e a importância dos sistemas de freio são evidentes e vêm aumentando na mesma proporção em que a relação distância/tempo aumenta. Tem-se exigido da área

automotiva investimentos para a melhoria dos dispositivos de frenagem em razão do aumento da velocidade média dos veículos, do aumento do número de veículos, das exigências de leis e das recomendações de normas.

Os sistemas de freios pneumáticos, utilizados em caminhões e ônibus, são versáteis e podem ser facilmente adaptados ao projeto do veículo. Por isso, muitos são os circuitos pneumáticos existentes.

Nesse trabalho são discutidas e apresentadas as características de um circuito pneumático básico. O trabalho foi dividido em quatro subcircuitos: subcircuito de freio de serviço traseiro; subcircuito de freio de serviço dianteiro; subcircuito de freio de emergência e estacionamento; e subcircuito de freio motor e auxiliares. Quando o veículo for projetado para acoplamento de reboque ou semi-reboque, os circuitos serão compostos de outros componentes encarregados de atuarem no reboque e simi-reboque.

Além da parte pneumática deve-se considerar os dispositivos montados junto ao cubo de rodas, que executam a ação de frenagem ,propriamente dita.

As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), legislam sobre a terminologia utilizada na área de freio, determinando as condições de operação normal dos freios.

Capítulo 6

Desenvolvimento da Metodologia

6.1 Aspectos gerais

Do projetista é requerido alto grau de intuição, perseverança, bom senso, dentre outros qualificativos. Para que o desenvolvimento e a análise de projeto não fiquem dependentes das características individuais do projetista ou analista de projeto, é recomendável, então, utilizar metodologias que sistematizem e orientem todo o trabalho de criação, desde a fase da definição de tarefa até o projeto final[82,35]. Se além das técnicas tradicionais de projeto deseja-se incorporar os conceitos de confiabilidade, faz-se necessário sistematizar esse caminho de forma a aproveitar e a valorizar todas as informações disponíveis.

Como discutido nos primeiros capítulos, o tempo de planejamento e de desenvolvimento de novos produtos tende a reduzir gradativamente. No setor automotivo, o tempo de projeto diminuiu para a metade em relação a década passada. Concomitantemente, requerem-se ainda desses novos produtos respostas positivas quanto à poluição, à segurança, à aerodinâmica e à potência. Em outras palavras, os projetos tornaram-se mais complexos pela quantidade de variáveis hoje existentes e, ainda devem ser executados em tempos menores

A partir da década de oitenta a indústria automobilística impulsiona ainda mais o projeto e o desenvolvimento de produtos, em consequência da forte concorrência gerada pela entrada dos fabricantes orientais. Há, por isso, significativo investimento em tecnologia com acentuado destaque para a eletrônica embarcada, para a reciclagem e para a diminuição dos agentes poluentes. Ao mesmo tempo, devido ao desenvolvimento da eletrônica, começam a ser incorporados no setor automotivo os conceitos de confiabilidade. Vários são os trabalhos

relativos à eletrônica embarcada, que tratam da confiabilidade[30,39]. No Brasil há congressos específicos como: da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA) e da SAE - Brasil e Internacional.

Na área da mecânica automotiva esse desenvolvimento não acontece com a mesma rapidez. Poucos são os trabalhos publicados que abordam a confiabilidade em componentes ou sistemas mecânicos. Mendes[61] elaborou uma metodologia para a determinação da confiabilidade operacional dentro do período de garantia, a partir de informações de falha em caixa de câmbio. Rosa[81] desenvolve um modelo de análise de falha por sobrecarga para confiabilidade estrutural no projeto automotivo, detalhado para cargas que podem ser representadas pela distribuição normal e pela distribuição de Rayleigh. O trabalho de Rao e Tjandra[94] é também sobre confiabilidade estrutural, para um sistema de transmissão automotiva de três velocidades, utilizando as distribuições normal, logonormal e exponencial. Hsieh e Lu[49] divulgaram resultados de um trabalho de predição de falha e estimativa da confiabilidade de componentes e sistemas de veículos automotivos. Eles fizeram um acompanhamento de frota e registraram os dados de falha para serem processados posteriormente, a fim de obter os parâmetros da equação de Weibull.

A palestra de Kececioglu[54] sobre o estado da arte da Engenharia de Confiabilidade nos Estados Unidos confirma a carência de trabalhos específicos e publicações em confiabilidade na área automotiva.

Especificamente em freios pneumáticos automotivos a carência de trabalhos é ainda maior. São recentes e poucas as publicações que tratam dos aspectos da confiabilidade, vinculada à segurança, ao projeto ou manutenção de componentes, aos subsistemas ou sistemas de freios automotivos. Pallerosi e Paone[75] apresentaram, em 1991, um método para a determinação da confiabilidade em sistema de freio para automóvel baseado na análise da árvore de falha do circuito de freio. Em 1995, Dias [31,32} analisou a confiabilidade de freios automotivos, discutindo os aspectos que estão vinculados ao levantamento dos dados de falha, à segurança veicular e à determinação dos parâmetros da distribuição probabilística de Weibull.

Dado esse conjunto de variáveis propôs-se desenvolver uma metodologia para análise da confiabilidade dos circuitos de freios pneumáticos automotivos. Para viabilizar esta metodologia, fez-se o programa computacional BRAKEREL (*Brake Reliability Program*). O objetivo é fornecer aos projetistas e analistas de sistemas de freios pneumáticos, ferramentas

que lhes permitam incorporar as variáveis de confiabilidade, no projeto de componentes, nos subsistemas e sistemas de freios, em tempo de projeto.

6.2 Aspectos específicos

Metodologia é um processo que utiliza técnicas pré-definidas e convenções notacionais[82]. Em outras palavras, é a arte de dirigir uma atividade em direção ao objetivo final. Isso significa conhecer cada passo das diferentes etapas que constituem o desenvolvimento ou a análise de um produto. Se o produto já existe, devem-se estabelecer critérios que facilitem a análise de desempenho. Os freios pneumáticos automotivos, na maioria das vezes encaixam-se nesse caso.

A metodologia proposta visa dar ao engenheiro confiabilista parâmetros de projeto relativos à confiabilidade. Assim ele pode tomar decisões fundamentadas quanto à definição de investimentos em pesquisa e em desenvolvimento dos componentes, dos subcircuitos ou do circuito de freio como um todo. Para tanto, cinco etapas são propostas. A primeira está relacionada com a montagem do modelo físico. A segunda, que interage fortemente com a primeira, recomenda conhecer a função de cada item do circuito de freio pneumático que está sendo analisado. Na terceira etapa é estruturado o modelo confiabilístico. Na quarta faz-se o desenvolvimento do modelo matemático. É feito também a conexão entre os arranjos propostos no modelo confiabilístico e as relações matemáticas representativas desses arranjos. Na última etapa desenvolve-se o modelo computacional para viabilizar as entradas e as saídas requeridas para a análise que se deseja efetuar.

O método de análise representado na Figura 6. 1 mostra o fluxo de decisões e as reavaliações que devem ser encaminhadas para analisar confiabilisticamente um freio pneumático. Evidentemente, existe uma interdependência entre as diversas etapas a serem consideradas. O modelo confiabilístico depende do modelo físico (capítulo 5), que por sua vez é montado em função do conhecimento que se tem de cada item e das restrições impostas pelas exigências de funcionamento. Envolve o modelo matemático, que foi desenvolvido nos capítulos 3 e 4, a partir do qual foram estruturados os cálculos que são executados pelo programa computacional. Finalmente, depende do próprio modelo computacional (capítulo 7)

que viabiliza todas as entradas e saídas de dados e as combinações que se pode fazer a partir delas.

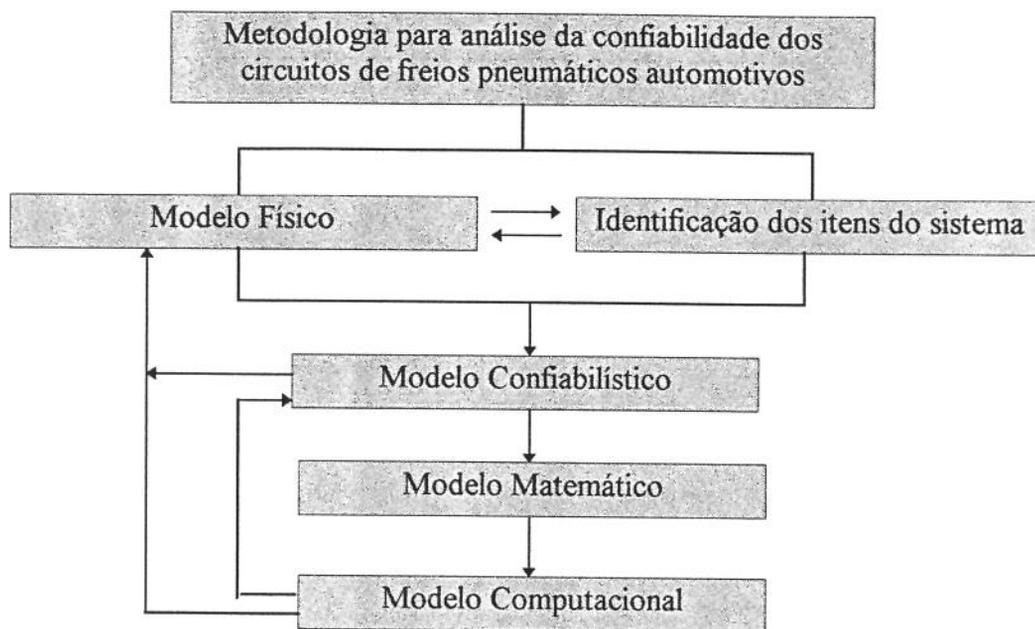


Figura 6. 1 Metodologia de análise

6.2.1 Modelo físico

O modelo físico está vinculado ao mundo real. Ele é uma representação gráfica do sistema elaborado a partir dos conhecimentos técnicos e da intuição. Pode ser utilizado para interagir com agentes externos ao problema e ao mesmo tempo para documentar a estrutura básica ou até mesmo detalhada do sistema. Contempla todas as funções requeridas para o funcionamento do circuito, vinculando-as aos componentes ou aos subcircuitos existentes. Nessa fase o analista faz uma abstração concisa e precisa do que o sistema proposto deve fazer, sem se preocupar com o “como” deverá fazer.

A modelagem física do circuito de freio pneumático para análise da confiabilidade divide-se basicamente em duas situações. A primeira está associada ao desenvolvimento de um circuito de freio pneumático. Nessa situação o modelo constitui-se no projeto do circuito. A equipe de projeto pode e deve lançar mão de todas as técnicas recomendadas nos manuais de desenvolvimento de projeto de produtos. O projeto obtido deve ser compreendido e criticado

por todo o “staff” envolvido na atividade. Além das variáveis de projeto, cada componente, subsistema ou o sistema geral, deverão ter definidas as suas condições de funcionamento e de falha. A segunda situação está relacionada com a avaliação de circuitos pneumáticos já existentes. As figuras [5.2, 5.3, 5.4, 5.5] representam os modelos básicos desses circuitos. Nelas vê-se a interligação dos itens que vão executar a ação de frenagem. Em síntese, está representada a lógica de funcionamento do circuito.

Embora os componentes, os subcircuitos e o circuito geral de freio pneumático sejam amplamente conhecidos do ponto de vista do uso, eles precisam ser profundamente estudados antes da implementação de uma análise confiabilística. Isso quer dizer que o arranjo físico baseado na confiabilidade deve ser detalhado, englobando variáveis como:

- pressão máxima de trabalho, estabelecida por norma;
- pressão de serviço, recomendada por norma;
- pressão de segurança, recomendada por norma;
- condições de falha paramétrica;
- condições de falha catastrófica;
- dispositivos de segurança;
- vida recomendada para o sistema;
- tipo de falha aberta ou fechada;
- associação de sensores;
- utilização de comutador;
- tipo de arranjo.

6.2.2 Identificação dos itens do sistema

O analista precisa identificar claramente quais são os itens (componentes, subsistemas ou sistemas) dentro do sistema geral que vão ser incluídos na análise confiabilística. É preciso atribuir-lhes um código, um nome e uma descrição. Os itens de uso muito eventual, ou os que ao falharem não interferem na confiabilidade do sistema, podem ou não entrar na relação. Sua

desconsideração, pelo menos num primeiro momento, contribui para a simplificação do sistema, facilitando a análise.

A descrição, na medida do possível, deve ser sucinta mas ao mesmo tempo clara, de forma que qualquer outro analista confiabilístico compreenda a importância do item descrito. Recomenda-se descrever a função que o item exerce dentro do sistema, a condição ideal de funcionamento e a condição de falha. Evidentemente, essas condições dependem do local onde o item está instalado. Se estiver em operação normal, num circuito, se montado no veículo, tem-se uma condição. Se estiver sendo testado em laboratório, em ensaio normal ou acelerado, as condições se alteram. Se estiver na reserva, é preciso especificar se está na condição passiva ou ativa e, ainda, se a confiabilidade diminui com o tempo ou se permanece constante até entrar em operação.

Nessa etapa é recomendável conhecer e especificar as variáveis que serão utilizadas dentro do modelo confiabilístico. É claro que essas variáveis são função do método de análise pretendido. Para a obtenção dos parâmetros da equação de Weibull pelo Método da Categoria Mediana, é necessário dispor das informações sobre o período de vida até falha (PAF) ou o período de vida entre falha (PEF), quantos itens falharam e quantos foram suspensos, para a amostra de itens que estiver em avaliação. Esse período de vida é mais conhecido por “tempo”, definido em “*Mean Time Between (To) Failure (MTBF)*” ou tempo médio entre (até) falha (TMEF OU TMAF). Pode ser expresso na unidade de comprimento (km), número de ciclos (n) ou tempo (h). No setor automotivo o comprimento representa a distância percorrida em (km) e o tempo em horas (h). O número de ciclos (n) é mais adequado para definir o período de vida do componente nos ensaios em laboratório.

6.2.3 Modelo confiabilístico

O modelo confiabilístico é construído a partir das informações contidas no modelo físico e na identificação dos itens do sistema. Constitui-se num diagrama representativo da seqüência funcional do circuito. Representa a interrelação entre os itens, considerando que todos estão operando normalmente, sem defeitos. No caso do freio, por exemplo, o modelo confiabilístico segue o fluxo de energia pneumática que vai desde o dispositivo, que faz funcionar o compressor, até a frenagem das rodas. A partir do modelo físico é definido o

diagrama de funcionamento do circuito real para a condição normatizada de trabalho, ou seja, supõe-se que todos os itens estejam funcionando perfeitamente. São estabelecidas as composições dos itens segundo arranjos em série, em paralelo, compostos que sejam mais apropriados àquela específica condição de funcionamento.

O modelo confiabilístico pode ser utilizado, também, para estudar os reflexos resultantes do aperfeiçoamento técnico do componente, circuito ou parte dele. Da mesma forma pode ser avaliada a influência do sensor ou das redundâncias implementadas sobre o circuito. Possibilita, então, criar alternativas para redefinir o modelo físico a partir dos resultados proporcionados pela avaliação confiabilística. São definidos os mecanismos para melhorar a confiabilidade do sistema, mantendo-se inalterada a operacionalidade.

O modelo confiabilístico é construído para uma determinada condição de funcionamento do sistema que se deseja analisar. O funcionamento de um circuito de freio pneumático, por exemplo, é admitido normal quando a pressão de serviço estiver na faixa de 7,5bar a 8,5bar [59,60,92]. Nessa condição, o sistema de freio de serviço deve garantir uma desaceleração média de $5,8\text{m/s}^2$, ou então parar o veículo numa determinada distância[14]. O sistema de freio que garanta essas condições é considerado normal.

Para definir o modelo confiabilístico o analista deve preocupar-se em sistematizar todas as informações que possam identificar, no sistema, os setores “fortes” e “fracos”, do ponto de vista da confiabilidade. Por esse caminho o analista tem condições de orientar os investimentos em pesquisa e em desenvolvimento para aqueles setores que representam os chamados “pontos de estrangulamento”.

Neste trabalho o modelo confiabilístico está sendo desenvolvido com o objetivo de analisar o circuito pneumático sob três pontos de vista: análise geral do circuito de freio pneumático; análise do circuito por subsistemas de “atuação” e análise do circuito por grupos de função. A proposta é agrupar esses componentes em subsistemas de “atuação”, também chamado de subcircuito de “atuação”. Cada subsistema ou subcircuito de “atuação” foi definido em função do tipo de energia predominante que proporciona a atuação do item no circuito de freio. Por exemplo: no subcircuito de “atuação” pneumática os componentes têm o objetivo de agir a partir da pressão pneumática. No de “atuação” mecânica os componentes se interagem através de braços de alavancas, energia potencial, cinética, atrito.

Para os circuitos analisados[58,59,60,86,87,37,84] foram identificados cinco subsistemas de “atuação”:

- pneumática(P);
- hidráulica (H);
- mecânica (M);
- elétrica (E);
- eletrônica (T).

Evidentemente, os cinco subsistemas não estão presentes em todos os circuitos. Essa divisão é justificada em função das especificidades que cada um desses subcircuitos apresenta, tanto do ponto de vista do projeto quanto do ponto de vista de fabricação. Os engenheiros projetistas dos itens que constituem o subsistema de atuação pneumática não são, via de regra, os mesmos que projetam os subsistemas de atuação mecânica, que provavelmente são diferentes dos que projetam sistemas de atuação elétrica, e assim por diante. Por isso, o modelo confiabilístico deve permitir ao analista, obter informações separadamente. Dessa forma será possível direcionar os investimentos em tecnologia e em desenvolvimento naqueles subsistemas que estão mais comprometidos, do ponto de vista da confiabilidade. Ocorrerá, então, racionalização do processo de investimentos em tecnologia, melhorando assim a confiabilidade do circuito.

O modelo confiabilístico deve ainda admitir outras formas de análise do circuito. A exemplo dos catálogos da Mercedes Bens do Brasil [58], verificou-se a importância de se analisar a confiabilidade de grupo de itens que tenham afinidades de funções. Essas afinidades, no caso de freios pneumáticos, estão associadas, principalmente, à posição do item dentro do circuito e à função que deve executar. Nessa análise é preciso contemplar as tendências tecnológicas. Neste momento, percebe-se que:

- é forte a tendência de compactação dos componentes ligados à geração de energia;
- são muitos os investimentos para substituir as válvulas de acionamento pneumático por dispositivos eletrônicos;
- deverá ocorrer a diminuição do número de conexões e tubulações;
- há tendência em substituir os freios de sapatas por freios de discos.

Esse universo de perspectiva foi analisado e discutido com profissionais do setor industrial. Concluiu-se que é bom extrair do modelo confiabilístico as informações contidas no modelo físico e que é necessário estabelecer projeções, em função das tendências existentes.

Dado esse conjunto de variáveis, dividiu-se o circuito de freio pneumático nos seguintes grupos de função:

- Motor;
- Conexão Motor-Compressor - MC;
- Gerador de Energia - GE;
- Acumulador de Energia - AE;
- Válvulas de Acionamento - VA;
- Controle e Alerta - CA;
- Freio Auxiliar - FA;
- Eixo Dianteiro - ED;
- Eixo Traseiro - ET;
- Eixos da Carreta - EC;
- Relação Pneu-Solo - PS.

Essas divisões facilitam a comparação de um circuito em relação ao outro. Cada modelo de caminhão ou ônibus tem um circuito de freio distinto, tanto para veículos com mesmo fabricante, como para veículos de fabricantes diferentes. Essas divisões simplificam os circuitos, facilitando, por exemplo, a construção de árvores morfológicas. A partir dessas divisões, torna-se mais fácil comparar confiabilisticamente o circuito de freio, identificando os grupos de função que são mais recomendáveis.

Em resumo, no modelo confiabilístico devem estar embutidas todas as entradas e saídas que se desejam analisar: presentes e futuras.

O motor é um grupo à parte. Ele é o dispositivo que gera a energia para o circuito de freio. Sua falha induz à falha de modo comum. O grupo caracterizado como relação pneu-solo responde à ação do circuito de freio. Tanto um como outro são importantes para o estudo da frenagem. Não são, contudo, objeto deste trabalho.

6.2.4 Modelo matemático

Nos modelos matemáticos são escolhidos os algoritmos básicos para a implementação das principais funções do sistema. Com base nesses algoritmos a estrutura do modelo confiabilístico é otimizada visando à sua eficiente implementação. Nos capítulos 3 e 4 foram desenvolvidas as funções matemáticas que serão utilizadas na solução do problema que está sendo proposto.

O modelo matemático é, por isso, totalmente dependente do modelo confiabilístico. Depende do grau de precisão que se deseja para os cálculos; do tipo de item; do tipo de arranjo: em série, em paralelo, compostos; da existência de sensores e de comutadores. É preciso definir a dependência ou a independência entre os eventos de falha e se esses eventos são ou não mutuamente exclusivos.

Outro fator importante é o tipo de função densidade de probabilidade de falha que será adotada. Neste trabalho optou-se pela função probabilística de Weibull, bi-paramétrica. No capítulo 3 foi apresentado o equacionamento matemático necessário para avaliar a confiabilidade, a não-confiabilidade, a taxa instantânea de falha e a função densidade de probabilidade de falha para o componente, para o sensor e para o componente equivalente. No capítulo 4 foi desenvolvida a formulação matemática para a associação dos itens em componentes reduzidos com arranjos do tipo série e paralelo com redundância ativa ou com redundância passiva. Considerou-se os eventos de falha independentes e mutuamente exclusivos.

6.2.5 Modelo computacional.

O programa computacional é, dentro da metodologia, a ferramenta que permite a interação do analista com os dados disponíveis. Deve, ainda, ser confiável, didático, auto-explicativo, compatível com computadores pessoais, acessível ao usuário que não trabalha com a informática e adaptável às entradas e saídas necessárias para cada caso.

Essas variáveis devem constituir-se em referência para a elaboração ou para a aquisição de um programa computacional para análise da confiabilidade de sistemas.

No capítulo 7 são expostas todas as decisões tomadas e os passos dados para o desenvolvimento e a utilização do programa computacional BRAKEREL (Brake Reliability Program). Esse programa será desenvolvido para constituir-se numa ferramenta que dê ao analista a possibilidade de:

- obter os parâmetros da função probabilística de Weibull através do método da categoria mediana a partir dos tempos até a falha, para componentes, sensores e comutadores;
- cadastrar componentes, sensores e comutadores;
- cadastrar circuitos;
- alterar e atualizar os dados dos cadastros;
- gerar arranjos do tipo série e paralelo;
- reproduzir os modelos confiabilísticos e associar os arranjos ao modelo matemático;
- obter a função confiabilidade e não-confiabilidade no formato gráfico na escala de Weibull (papel probabilístico de Weibull), ou na forma de tabela para componentes, sensores, comutadores, componentes reduzidos e para o sistema geral;
- obter a função confiabilidade, não-confiabilidade, a taxa instantânea de falha e a função densidade de probabilidade de falha no formato gráfico linear ou na forma de tabela para componentes, sensores, comutadores, componentes reduzidos e para o sistema geral;
- fazer simulações para verificar a influência do parâmetro de forma ou da taxa de falha, ou dos dois simultaneamente sobre as funções da distribuição probabilística;
- fazer simulações para verificar a influência do sensor sobre as funções da distribuição probabilística;
- permitir avaliar a evolução da confiabilidade sobre um componente quando a ele é agregada tecnologia, ou for associado a um sensor ou, ainda, quando ele for acoplado a um item redundante.

Além disso o programa será estruturado para:

- obter os parâmetros da equação de Weibull através do Método do Sucesso;
- obter os parâmetros da equação de Weibull para ensaios acelerados;

- exportar bancos de dados para arquivos externos ao programa;
- importar bancos de dados de arquivos externos ao programa.

6.3 Comentários

A metodologia para análise de sistemas de freios pneumáticos automotivos foi desenvolvida para fornecer aos analistas e projetistas de freios um método de ação que lhes dê condições de visualizarem, globalmente, o elemento de análise.

A metodologia está sintetizada em cinco etapas: construção do modelo físico; identificação dos itens do sistema; construção do modelo confiabilístico; desenvolvimento do modelo matemático; e do modelo computacional.

Neste trabalho, admite-se conhecido o modelo físico, com todos os itens já identificados. Foi desenvolvido o modelo confiabilístico, o modelo matemático e o modelo computacional, o qual resultou no programa BRAKEREL.

Capítulo 7

Programa Computacional

7.1 Aspectos gerais

O programa computacional BRAKEREL (Brake Reliability Program) é fundamental para a metodologia de análise da confiabilidade descrita no capítulo 6. Foi desenvolvido para auxiliar o projetista e o analista de sistemas de freios pneumáticos. Pelo programa é permitido, em tempo de projeto, consultar ou criar banco de dados de amostras, componentes e circuitos, analisar a confiabilidade, a não-confiabilidade, a taxa instantânea de falha, a função densidade de probabilidade de falha e fazer cruzamentos entre os dados cadastrados, ou com outros, externos ao banco de dados.

O BRAKEREL foi desenvolvido com o fim específico de analisar confiabilisticamente os circuitos de freios pneumáticos. A concepção do programa, porém, teve uma abordagem mais geral. Por isso a estrutura da programação foi flexibilizada e, sempre que possível, generalizada, a fim de admitir futuras implementações, visando uso mais geral.

Por isso, utilizou-se uma programação estruturada, baseada em eventos e para ambiente *windows*. O BRAKEREL foi programado em *Visual Basic for Windows*, versão 3.0. Essa linguagem permite a programação modular, utiliza os conceitos de programação orientada a objetos, muito embora não use, segundo Holzner[47], os conceitos de classe e herança como ocorre na verdadeira programação por objeto.

O “*software*” de programação *Visual Basic for Windows* é compatível com o gerenciador *Windows* 3.0 e versões posteriores. Dispõe de interfaces que permitem ligar-se com o *Word for Windows*, com o *Microsoft Excel* e com o *Microsoft Access*. Além disso,

como afirma Holzner[47], permite trabalhar com bibliotecas de ligação dinâmica para servir de interface com o *Visual C*.

7.2 Breve histórico

O BRAKEREL é resultante de um conjunto de idéias e trabalhos que foram sendo elaborados ao longo de pesquisas que visavam associar o conceito de análise confiabilística aos processos de projeto, de fabricação e de manutenção.

O programa computacional COOPERA (Confiabilidade Operacional no Período de Garantia), feito por Mendes [61], teve por objetivo determinar a confiabilidade operacional de caixa de câmbio de automóveis, utilizando a função probabilística de Weibull, para produtos novos, dentro do período de garantia, a partir dos registros dos períodos de uso (meses) ou distâncias percorridas (km) até falha. Foi elaborado na linguagem CLIPPER versão *Summer 87*, com banco de dados estruturados em dBase III *plus*. O programa foi feito para fornecer os gráficos para a probabilidade acumulada de falha (Não-confiabilidade) na escala de Weibull, calculando também os parâmetros de forma, as taxas de falha para um certo nível de confiança.

Casconi[25] desenvolveu o programa Computacional RAMP (Reliability Availability Maintainability Program) para auxiliar o gerenciamento da função manutenção em sistemas contínuos de produção. O programa calcula a confiabilidade, a manutenibilidade e a disponibilidade de componentes, sensores e componentes equivalentes e de sistemas. O RAMP foi estruturado para um sistema particular: uma linha de produto. Para utilizá-lo em outros sistemas era requerida a alteração do programa “fonte” em função da árvore de falha desejada. O programa foi elaborado na linguagem Turbo Pascal 5.01. Atualizações posteriores aperfeiçoaram vários aspectos do programa[74].

Guido[45] propôs uma metodologia para ensaios acelerados, também baseada na distribuição de Weibull. O objetivo era desenvolver uma função acelerante geral, mais precisa que as normalmente utilizadas. Para isso, gerou o programa computacional ATP (Accelerated Testing Program), desenvolvido na linguagem Turbo Pascal 5.01 que a partir dos dados sobre falhas ou suspensões em ensaios acelerados, calculava as funções acelerantes e as funções normais para a distribuição probabilística de Weibull.

Devido a esses desenvolvimentos muito tempo foi empregado no sentido de aproveitar as implementações já feitas em termos de programação, para resolver o problema de confiabilidade em sistemas não contínuos, como é o caso dos circuitos de freios pneumáticos automotivos. O sistema de freio pneumático é muito versátil e, normalmente, é definido um circuito para cada modelo de veículo. Exige-se, portanto, um programa computacional que dê respostas a essa mobilidade, devendo gerar, de maneira “amigável”, um modelo confiabilístico para cada árvore de freio. Além dessa premissa, o programa deve adaptar-se à metodologia para análise dos freios pneumáticos, objeto desse trabalho.

Por tudo isso, várias foram as tentativas de adaptar a estrutura de programação em Pascal, do RAMP, às saídas no formato de gráfico e de tabelas para o programa BRAKEREL. A cada instante, porém, limitações inerentes à própria linguagem de programação utilizada se interpunham exigindo soluções que demandavam muito tempo de programação. Como exemplo podem ser citadas as saídas dos cálculos na forma de gráficos e de tabelas. A estética requerida para as saídas exigiam mais do que a linguagem fora estruturada para fazer. A interface com o usuário tornava-se antiquada quando comparada com as interfaces dos programas que estavam chegando ao mercado. Além disso, as soluções das funções iterativas programadas para serem resolvidas recursivamente, dependendo do problema proposto, incorriam no estouro da “*memória de pilha*”. Esse fato criava conflitos com os “*softwares*” de gerenciamento do sistema, refletindo em erros de execução do programa ou bloqueio do sistema como um todo.

Diante desse quadro e ainda objetivando aproveitar o que já estava pronto no RAMP, iniciou-se a programação do BRAKEREL, utilizando o “*software*” de programação PASCAL 7.0 *for Windows*. Fez-se um estudo detalhado dessa linguagem de programação[88], objetivando implementar a estrutura de programação baseada em objetos. Concluiu-se que as inovações apresentadas pelo novo “*software*” não resolviam de forma eficiente os problemas existentes. Decidiu-se, finalmente, manter a estrutura de programação orientada a objetos optando, no entanto, por programar em *Visual Basic for windows* versão 3.0. A partir da metodologia proposta no capítulo 6, foram reelaborados os conceitos que deveriam nortear a estrutura de programação. Optou-se pela idéia de modularidade, organizando cada parte do programa de maneira independente. Investiu-se fortemente na padronização das variáveis, das saídas gráficas, das tabelas, dos bancos de dados, objetivando atualizações futuras.

7.3 O programa BRAKEREL

O programa computacional BRAKEREL (Brake Reliability Program), como já comentado, foi desenvolvido para auxiliar o projetista e o analista de sistemas de freios pneumáticos automotivos, nas tarefas de projeto e de análise de sistemas de freios.

O BRAKEREL, embora tenha sido programado para analisar sistemas de freios pneumáticos, teve sua programação definida para admitir futuras atualizações (*upgrade*). Foi, por isso, tratado como um protótipo. Isso significa dizer que algumas soluções foram implementadas para demonstrar a viabilidade da estrutura de programação utilizada. Por exemplo: a taxa de falha e o parâmetro de forma são calculados somente pelo método da Categoria Mediana. O “*zoom*” da confiabilidade linear (Figura 7. 17) foi viabilizado só para o componente.

O programa foi dividido em dois grandes blocos: o bloco de armazenamento e composição dos dados e o bloco de análise. O acesso a esses blocos e às outras informações sobre o programa é feito através da tela de menu principal, Figura 7. 1.

A barra de “*menus*” é a principal interface entre o programa e o usuário. Todos os comandos que estão colocados na barra de menu exibem uma caixa de diálogo, através da qual escolhe-se a opção desejada. Através do

- menu **arquivo**: pode-se abrir, importar, exportar, imprimir arquivos e sair do programa;
- menu **editar**: pode-se fazer anotações que se fizerem necessárias à análise como pode ser visto na Figura 7. 1;
- menu **banco de dados**: geram-se os bancos de dados para amostras, componentes, sensores e circuitos;
- menu **análise**: faz-se a análise dos componentes e circuitos;
- Menu **ajuda**: obtém-se informações sobre o programa.

7.4 Banco de dados

O banco de dados foi dividido em 4 áreas:



Figura 7. 1 Menu principal

7.4.1 Banco de dados de componentes

O cadastro dos componentes no banco de dados foi concebido para facilitar a entrada e a manipulação das informações relativas aos componentes, tanto para aqueles que já têm definidos os parâmetros de forma e as taxas de falha quanto para os que terão essas informações geradas a partir de resultados experimentais.

Para os itens que possuem todos os dados faz-se o registro do código, da descrição, da taxa de falha, do parâmetro de forma e da existência ou não de sensor associado ao item.

Para os itens que só dispõem dos dados relativos ao período de vida até falha ou suspensão, faz-se somente o registro do código e da descrição do item. As informações relativas às taxas de falha e aos parâmetros de forma, que serão obtidos a partir da análise dos resultados experimentais, são calculados pelo programa BRAKEREL, através da rotina de cálculo dos parâmetros da equação de Weibull. Essa rotina está inserida no menu cadastro de amostras.

7.4.2 Banco de dados de sensor

O banco de dados de sensores e de comutadores é semelhante ao do componente. Quando o sensor ou o comutador for registrado de forma independente, utiliza-se a mesma tela

para o registro do componente, Figura 7. 2. Nesse caso, o código do sensor deve iniciar pelas letras SE e o do comutador, pelas letras CM.

Para o caso de componentes equivalentes com sensor real, então, os dados do sensor deverão ser cadastrados na mesma tela da Figura 7. 2, no campo chamado de “dados do sensor”.

Cadastro de Componentes

Código do Componente: C01

Descrição: COMPRESSOR

Taxa de Falha: 2 x 10⁻⁶ Parâmetro de forma: 1.5

Opção de Sensor

Sem Sensor Sensor Real Sensor Perfeito

Dados do Sensor

Código:

Descrição:

Taxa de Falha: x 10⁻⁶ Parâmetro de Forma:

Gravar Retornar

Figura 7. 2 Cadastro de componentes

7.4.3 Banco de dados de amostras

O banco de dados de amostras está estruturado para registrar os itens que foram ensaiados até a falha ou suspensão. Primeiro registra-se o componente como indicado na Figura 7.2. Para calcular os parâmetros da equação de Weibull é preciso ter os resultados experimentais. A inclusão desses resultados é feita através do seguinte procedimento:

- 1 - seleciona-se através do banco de dados do menu principal, Figura 7. 1, a tela chamada de “amostras - criação e alteração”, Figura 7. 3. Nessa tela, recuperam-se os

itens que foram cadastrados na Figura 7. 2, através do “botão” da barra de rolagem, colocado no lado direito do campo do “código para nova Amostra”;

2 - faz-se a seleção da unidade do período de uso e aciona-se o botão “incluir itens na amostra atual”;

3 - faz-se a inclusão ou atualização dos itens na amostra através da tela da Figura 7.4, registrando o código do item e o período até falha ou suspensão;

4 - Através do botão “valor dos parâmetros” da Figura 7.3, aciona-se a rotina que calcula os parâmetros da equação de Weibull: taxa de falha característica, vida característica e parâmetro de forma, como mostra a Figura 7.5. Acionando o botão “tabela” dessa tela acessa-se a Tabela 7.1, que contém o relatório dos dados que foram registrados para cada item da amostra e os cálculos dos números de ordem e da categoria mediana (F). Pelo botão “gráfico” obtém-se o gráfico que fornece a distribuição da probabilidade acumulada de falha (F), ou não-confiabilidade, em função do período de vida da amostra em questão.

A captura de tela mostra uma interface gráfica de usuário com o título "Amostras - Criação e Alteração". No topo, há uma barra de rolagem com o código "VALV22" e um botão de seta para baixo. Abaixo, o campo "Descrição:" contém o texto "VÁLVULA DE PEDAL" com botões de seta para cima e para baixo. A seção "Unidade de Período de Uso" possui três opções de radio button: "Horas (h)", "Ciclos (n)" e "Distância (km)", sendo esta última selecionada. À esquerda, há uma lista intitulada "Amostras já existentes:" com o item "VALV22" destacado. À direita, há cinco botões empilhados: "Atualizar", "Incluir Itens na Amostra Atual", "Valor dos Parâmetros", "Nova Amostra" e "Retornar".

Figura 7. 3 Criação e alteração das amostras

O item de código VALV22 constitui-se de uma amostra composta de 11 itens que foram ensaiados até a falha ou suspensão. Os valores dos períodos até falhas ou suspensões foram adotados para servirem de exemplo para a utilização do banco de dados de amostras.

Figura 7. 4 Inclusão dos itens nas amostras

Figura 7. 5 Valores calculados dos parâmetros da equação de Weibull

Tabela 7. 1 Relatório dos dados dos itens da amostra

Tabela da Amostra

Código da Amostra: VALV22
 Descrição: VÁLVULA DE PEDAL

Cód.Item	Período [km]	F ou S	Núm. Ordem	Categoria
PEDAL05	20.000	F	1,00000	0,06301
PEDAL01	35.000	F	2,00000	0,15041
PEDAL02	55.000	S		
PEDAL04	73.000	F	3,11111	0,24752
PEDAL03	80.000	F	4,22222	0,34463
PEDAL10	85.000	F	5,33333	0,44174
PEDAL11	90.000	F	6,44444	0,53884
PEDAL07	95.000	F	7,55556	0,63595
PEDAL08	100.000	F	8,66667	0,73306
PEDAL09	120.000	S		
PEDAL06	120.000	S		

Retornar

7.4.4 Banco de dados de circuito

Após o cadastro de todos os componentes e sensores, retorna-se ao menu principal para fazer o cadastro dos circuitos. Da mesma forma que para os componentes, é requerido de cada circuito um código e uma descrição. Através da tela de cadastro do circuito, Figura 7. 6, pode-se fazer o registro de novos circuitos, atualizar os já existentes ou fazer a composição do circuito.

Como já exposto, os componentes são cadastrados no banco de dados, através da Figura 7. 2, formando a lista geral dos componentes. Nessa lista estão todos os itens que serão

utilizados em qualquer circuito que se queira construir. A título de ilustração, supõe-se que a montadora de circuitos de freios “A” cadastre no banco de dados todos os itens que podem fazer parte dos seus sistemas de freios. Pela Figura 7. 6 registram-se os circuitos de freios para cada um dos modelos de circuito existentes ou que se deseja montar. O circuito chamado de “freio 1”, é um deles.

A interface gráfica intitulada "Cadastro de Circuitos" apresenta os seguintes elementos:

- Um campo de texto rotulado "Código do Circuito" contendo o valor "FREIO1".
- Um botão "Novo Circuito" à direita do campo de código.
- Um campo de texto rotulado "Descrição:" contendo o valor "CIRCUITO DE FREIO - TESTE 1".
- Um botão "Atualizar Informações do Circuito" à direita do campo de descrição.
- Um botão "Composição do Circuito" à direita do campo de descrição.
- Um botão "Retornar" na base da interface.

Figura 7. 6 Cadastro dos circuitos

7.4.4.1 Composição dos itens no circuito “freio 1”

Para fazer a composição do circuito desejado é preciso transferir os itens da “lista geral dos componentes” para a lista do circuito, chamado de “principal”, com o nome de freio1 como está mostrado na Figura 7. 7. Para isso seleciona-se o item no campo da lista geral e, pelo botão “inserir”, faz-se a transferência do item para a lista do “circuito principal”. A eliminação do item da lista “circuito principal” é feita pela tecla “remover”. Cada item que foi incluído na lista do “freio 1” fica sombreado, sinalizando que já foi transferido. Em cada um desses campos tem-se uma barra de rolagem para correr a lista dos itens existentes no campo.

Depois que a operação de constituição ou composição do banco de dados do circuito principal (freio 1) for feita, três caminhos podem ser seguidos:

- compor os arranjos em série/paralelo do “freio 1”;
- compor os subcircuitos de atuação;
- compor os grupos de função;

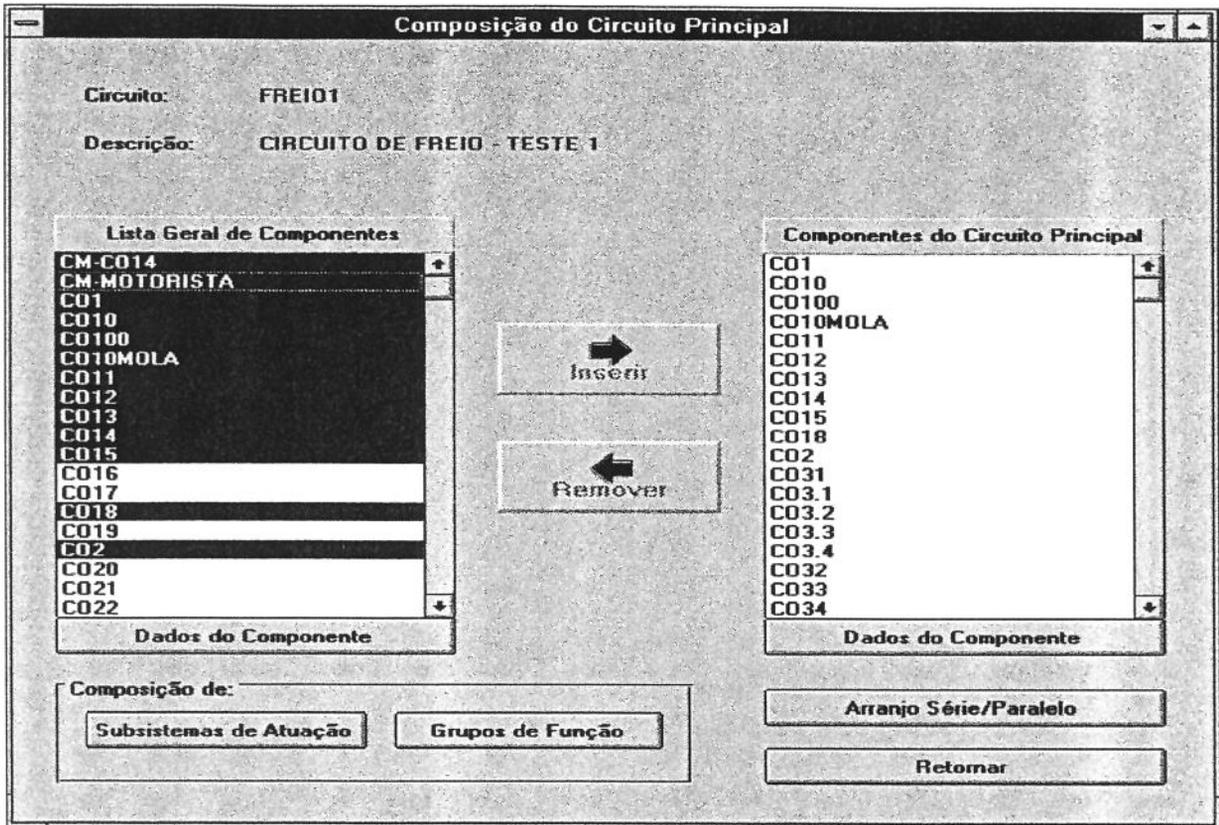


Figura 7. 7 Tela de composição do circuito principal

7.4.4.2 Composição dos itens nos subsistemas da “atuação”

Ao acionar a tecla “subsistemas de atuação” na Figura 7. 7, gera-se a figura 7.8, através da qual se faz a composição dos bancos de dados para os subsistemas de atuação: pneumática, hidráulica, mecânica, elétrica e eletrônica.

O botão colocado à frente de cada subsistema, ao ser acionado, ativa o banco de dados do respectivo subsistema. Os itens são selecionados na lista de itens do circuito principal (freio 1) e transferidos através do botão “inserir”. Isso é repetido até que os bancos de dados de cada um dos subsistemas sejam compostos. A partir disso, pode-se compor os arranjos série/paralelo para os subsistemas ou retornar para a Figura 7. 7.

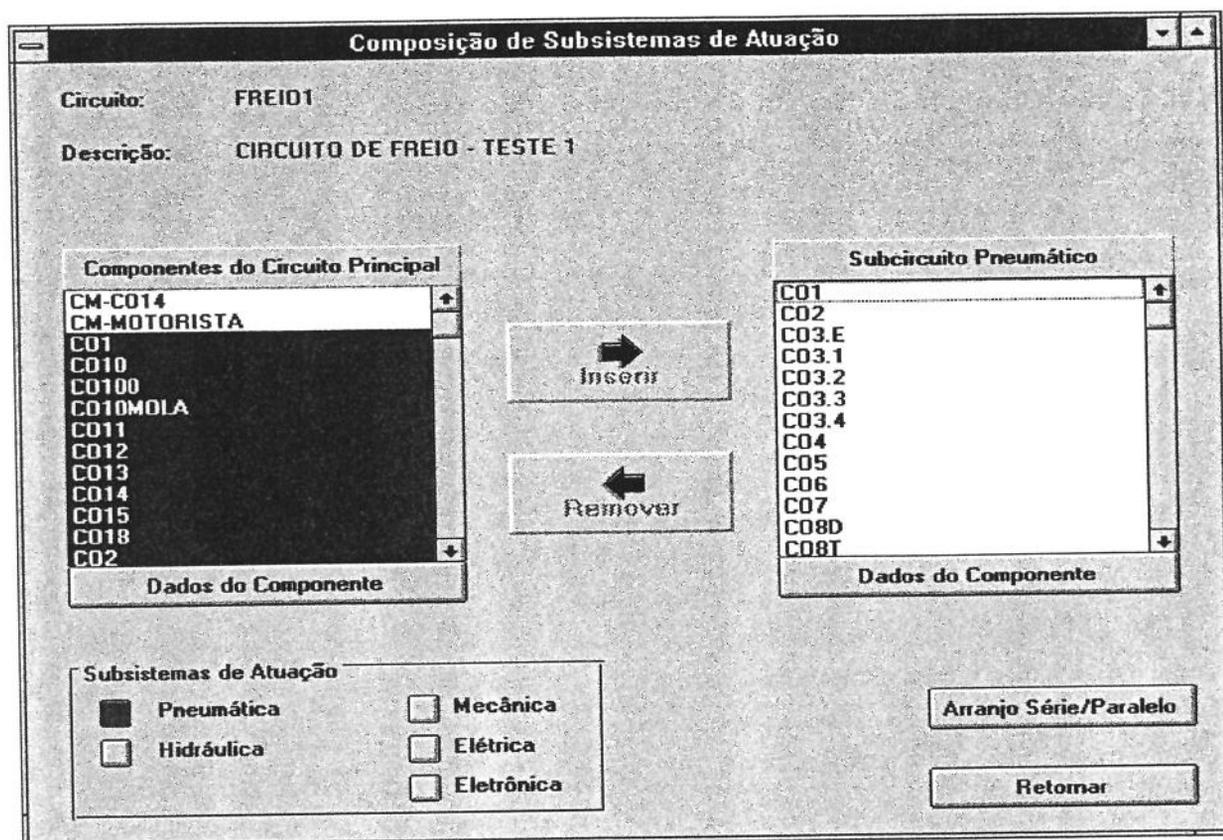


Figura 7. 8 Tela de composição dos subsistemas de “atuação”.

7.4.4.3 Composição dos itens nos “grupos de função”

A composição dos “grupos de função” segue a mesma sistemática anteriormente apresentada para os subsistemas de atuação. Através da tecla “grupo de função” da Figura 7.7, é acessada a tela, Figura 7. 9, de “composição de grupos de função”. Ao selecionar os botões no campo “grupos de função”, o programa apresenta o campo onde deverá ser formada a lista dos itens que farão parte desse grupo. E assim, seleciona-se cada grupo, fazendo-se a seguir a inserção dos respectivos itens, através do botão inserir, como está indicado na Figura 7. 9.

7.4.5 Arranjo em série/paralelo

Depois que todos os itens foram inseridos dentro dos respectivos circuitos, subsistemas e grupos de funções, faz-se a composição dos itens em “componentes reduzidos (CR) através dos arranjos série/paralelo. O botão “arranjo série/paralelo” existente em todas as telas de

composição e acessa a função, que permite arranjar os itens de acordo com a sua relação funcional, representada no modelo confiabilístico. O acionamento do botão associa a tela do arranjo em série/paralelo ao banco de dados da tela, onde está sendo feita a composição do respectivo arranjo, atribuindo o código a esse componente reduzido.

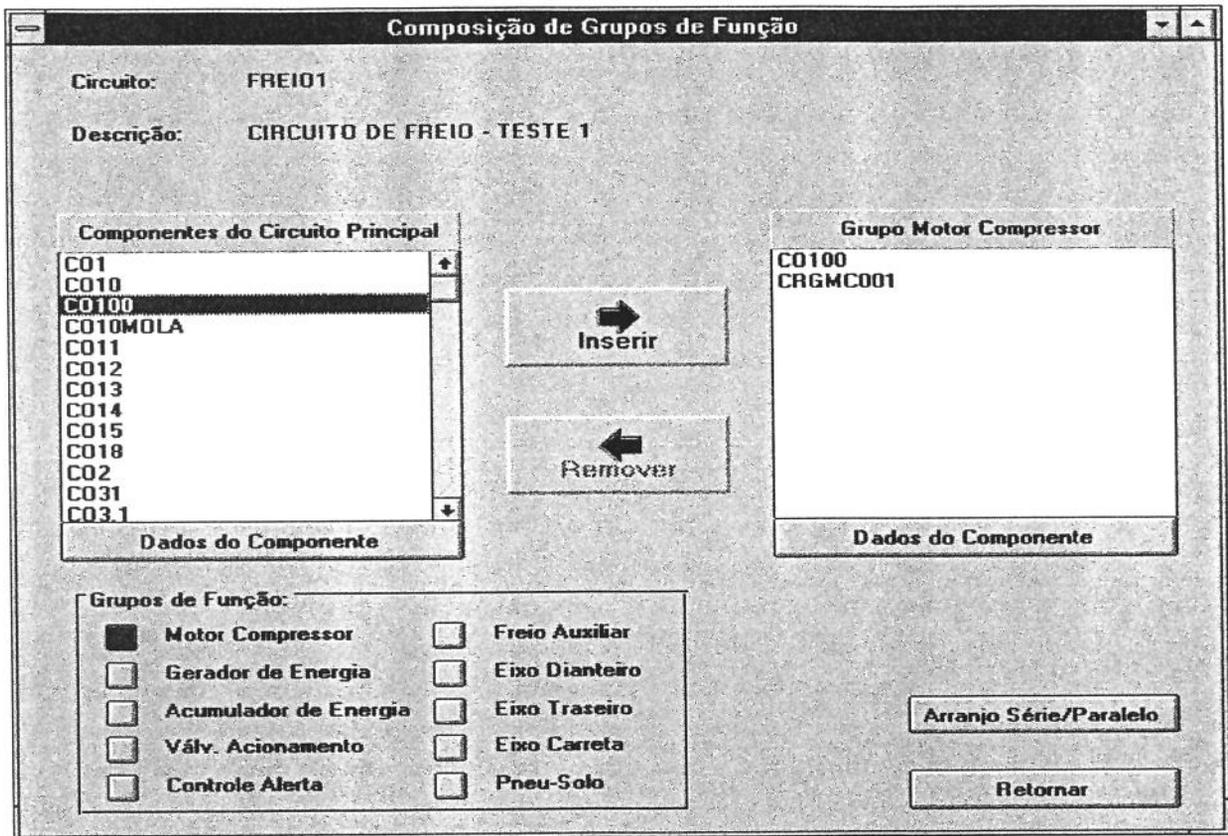


Figura 7.9 Tela de composição dos grupos de função.

A Figura 7.10 mostra a tela de arranjo para o circuito geral, onde serão compostos os componentes reduzidos do circuito geral (CRCG). A cada um desses é associado o código da tela e mais um valor numérico em ordem crescente gerado, automaticamente, pelo próprio programa.

Na tela de arranjo série/paralelo, os itens serão arranjados de acordo com a sua relação funcional explicitada no modelo confiabilístico. Para isso, como nos casos anteriores, seleciona-se o item na lista principal e faz-se a inclusão no campo de “Comp. Reduzido”, através do botão inserir (Figura 7.10). Após a inclusão os itens que irão formar o componente

reduzido (CRCG...) faz-se a escolha, no campo “arranjo”, de um dos arranjos acionados pelo botão contíguo:

- Série: esse arranjo pode ser feito para qualquer número de itens N , não importando se os itens são iguais ou diferentes. Nesse caso $K = N$, sendo que o N é definido pelo programa em função do número de itens que foram incluídos no campo “Comp. Reduzido”. (K é o número de itens necessários para o funiconamento do sistema e N é o número total de itens que estão disponíveis no sistema).
- Paralelo ativo: foi definido para o caso “puro” quando $K = 1$ e “parcial”, para $k = 2$ e $k = 3$. Em qualquer um dos casos, N é definido em função do número de itens que estão sendo incluídos na lista através do programa e o K (itens necessários) deve ser digitado pelo analista. Para o arranjo paralelo ativo puro, $k = 1$, ou seja, 1 item bom em N , a quantidade de itens (N) no arranjo é livre, tanto para os itens iguais, quanto para os diferentes. Para o arranjo paralelo ativo parcial, para itens iguais, o programa admite qualquer composição: k itens bons em N . Se os itens forem diferentes, então o programa resolve três composições de arranjos: “2 bons em 3”, “2 bons em 4” e “3 bons em 4”.
- Paralelo passivo: o programa foi definido para resolver arranjos paralelos passivos de composições de um item ativo (A) e um item na reserva (B), podendo serem iguais ou diferentes. O programa faz a seguinte interpretação: o primeiro item da lista do campo “Comp. Reduzido” é o item (A) (que está em operação), o segundo é o item (B) (que está na reserva) e o terceiro é o comutador.

Observa-se, porém, que a estrutura do programa admite implementar outros tipos de arranjos que se fizerem necessários à solução que se desejar.

Após a seleção do arranjo faz-se a efetivação do mesmo através do botão “arranjar”. Nesse instante o componente reduzido é incorporado ao banco de dados, como pode ser visto na Figura 7. 10. Para compor o próximo componente reduzido, aciona-se o botão “novo arranjo”. Repete-se, então, a operação.

A composição dos componentes reduzidos dos subsistemas de “atuação” ou dos “grupos de função” seguem a mesma a sistemática. Nesses caso, porém, o código do componente reduzido estará, automaticamente, associado ao subsistema de atuação ou ao grupo de função selecionado.

Para os subsistemas de atuação o código é formado pelas letras CRS, acrescido da letra P, para o pneumático, H para o Hidráulico, E para o Elétrico e T para o eleTrônico, e mais um contador numérico. Para os grupos de função o código é formado pelas letras CRG acrescido das letras representativas de cada grupo, mais a parte numérica, como foi definido no modelo confiabilístico. Essa numeração é incrementada, automaticamente, cada vez que o botão “novo arranjo” for acionado.

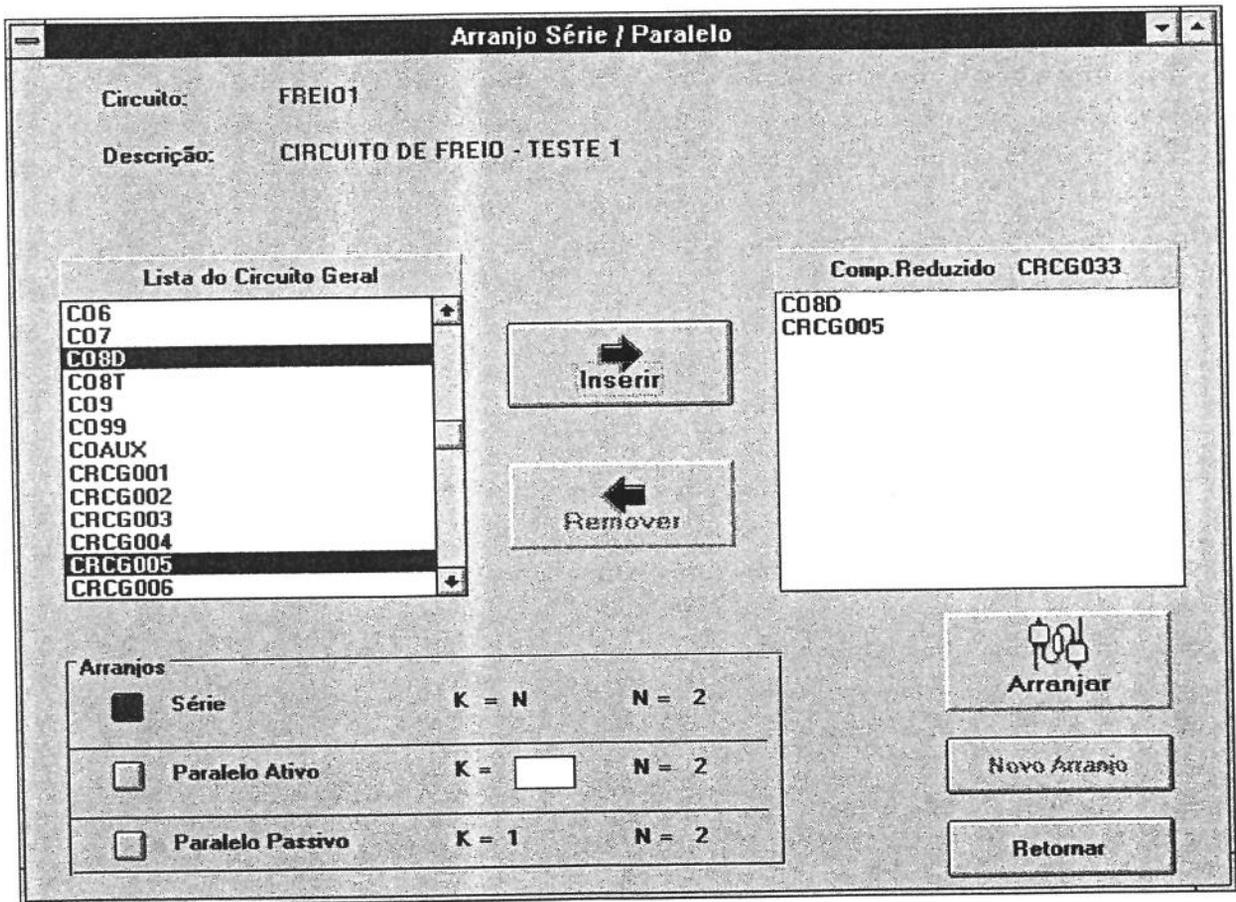


Figura 7. 10 Arranjo série/paralelo para formar os componentes reduzidos do circuito principal

7.5 Análise

Depois que todos os bancos de dados foram gerados faz-se, então, a “análise” dos itens cadastrados: componentes, sensores, comutadores, componentes equivalentes, componentes reduzidos e as combinações que se fizerem necessárias. O analista pode ainda analisar outros itens que não estão cadastrados. Esses novos dados, porém, ficam registrados em memória temporária e serão eliminados assim que outra operação for executada. Essa operação pode ser

feita apenas pela tela de “análise das funções confiabilísticas” do componente, Figura 7. 11, ou pela tela de “configuração de saídas”, Figura 7. 12.

7.5.1 Análise do componente

Para analisar um componente, primeiramente, há de se acessar o banco de dados através da tela de “análise das funções confiabilísticas do componente”, Figura 7. 11. Pela “barra de rolagem” existente no campo “código do componente”, seleciona-se o item a ser analisado. Essa ação recupera as informações registradas no banco de dados. Após a seleção do item faz-se o registro do período de vida a ser analisado em horas, ciclos ou distância percorrida e pressiona-se o botão “gráficos e cálculos”.

The screenshot shows a software window titled "Análise das Funções Confiabilísticas do Componente". It contains several input fields and controls:

- Código do Componente:** A text box containing "CO1" and a dropdown arrow.
- Descrição:** A text box containing "COMPRESSOR" and a vertical scrollbar.
- Taxa de Falha:** A text box containing "2" followed by "x 10⁻⁶".
- Parâmetro de Forma:** A text box containing "1.5".
- Período:** A text box containing "100000" and a dropdown arrow.
- Radio buttons:** Three radio buttons labeled "Horas (h)", "Ciclos (n)", and "Distância (km)". The "Distância (km)" option is selected.
- Opção de Sensor:** A group box containing three radio buttons: "Sem Sensor" (selected), "Sensor Real", and "Sensor Perfeito".
- Dados do Sensor:** A sub-section containing:
 - Código:** A text box and a dropdown arrow.
 - Descrição:** A text box and a vertical scrollbar.
 - Taxa de Falha:** A text box followed by "x 10⁻⁶".
 - Parâmetro de Forma:** A text box.
- Buttons:** Two buttons at the bottom right: "Gráficos e Cálculos" and "Retornar".

Figura 7. 11 Tela de análise da função confiabilística do componente

Através da tela da Figura 7. 11, pode-se fazer a análise dos dados dos itens que não estão cadastrados no banco de dados, ou mesmo modificar esses dados cadastrados incluindo dados de sensor, modificando taxa de falha e parâmetro de forma, alterando o período de vida do item etc. As modificações feitas através dessa tela ficam armazenadas em memória temporária, sendo eliminadas assim que outro item for selecionado.

O comando “gráficos e cálculos” acessa a tela de “configuração de saídas”. Nessa tela, Figura 7. 12, estão disponíveis todas as configurações de saídas no formato de gráficos ou de tabelas, para os cálculos, tanto para a escala de Weibull, quanto para a escala linear. Na escala de Weibull, obtém-se os gráficos para as funções confiabilidade e não-confiabilidade e, na escala linear, os gráficos para as funções confiabilidade, não-confiabilidade, taxa instantânea de falha e função densidade de probabilidade de falha.

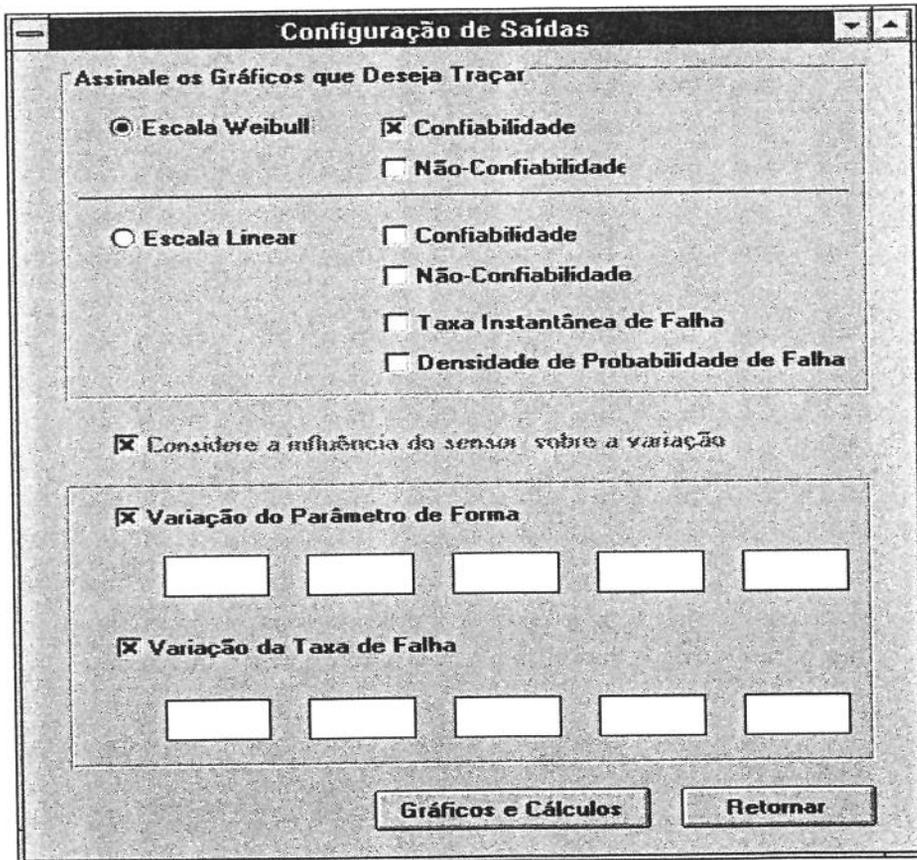


Figura 7. 12 Configuração de saídas gráficas

A tela permite ainda fazer diversos exercícios de análise. Ao item selecionado na Figura 7. 11 pode-se configurar até cinco diferentes parâmetros de forma, ou cinco taxas de falhas, ou ainda, cinco parâmetros de forma e cinco taxas de falhas, simultaneamente. Por essa tela, o projetista tem condições de fazer 15 comparações distintas para cada uma das 6 saídas na forma de gráficos, disponíveis na Figura 7. 12. Além disso, para todas as possibilidades, ele pode ou não considerar a influência do sensor que estiver associado ao componente da tela da Figura 7. 11. Essas opções aumentam, sensivelmente, o campo de análise.

7.5.2 Análise do circuito

Para analisar o circuito, o analista deve acessar, através da tela de “análise das funções confiabilísticas do componente reduzido”, Figura 7. 13, um dos três bancos de dados gerados para compor os componentes reduzidos: circuito principal, subsistema de atuação ou grupo de funções. Essa seleção é feita através da barra de rolagem existente no campo que identifica o banco de dados. Após essa escolha, faz-se a seleção do componente reduzido a ser analisado, também através da barra de rolagem, no campo “seleção do componente reduzido” onde está exposto o código do componente reduzido. Essa seleção implica recuperar do banco de dados todas as informações relativas ao componente reduzido: código, descrição e composição, tipo de arranjo e árvore de falha.

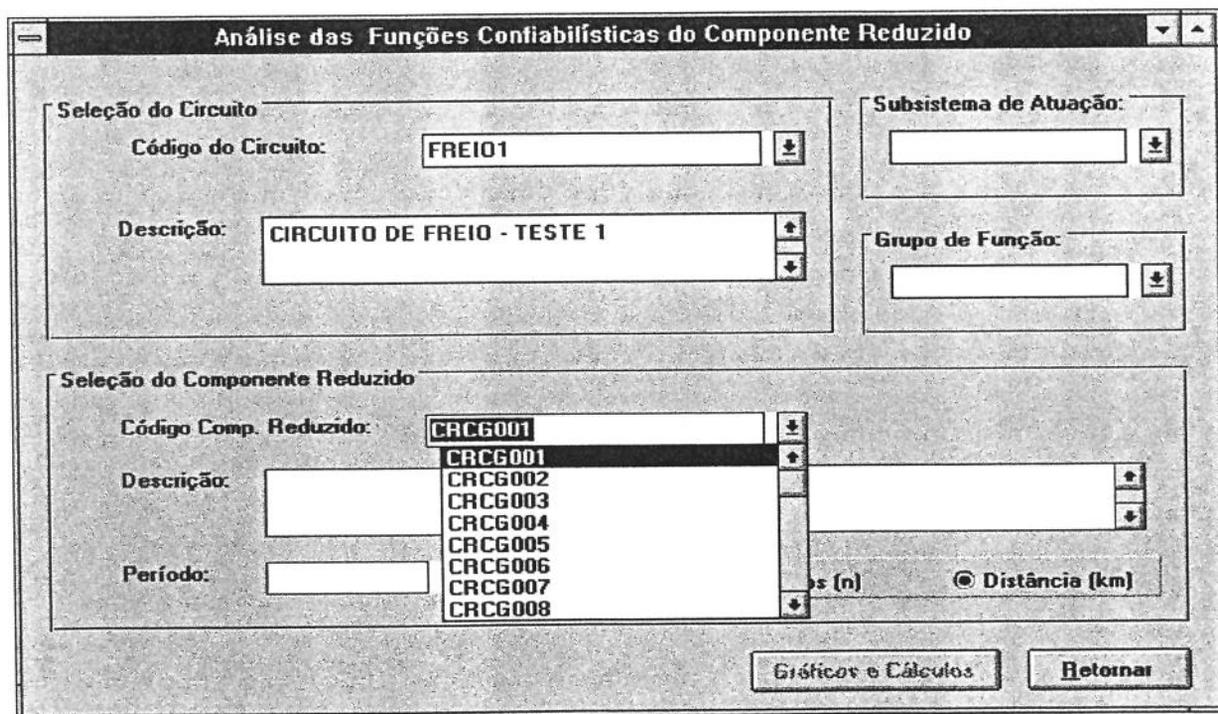


Figura 7. 13 Tela de análise da função confiabilística do componente reduzido

Para obter os gráficos e os cálculos, deve-se também atribuir um “período” de vida ou de uso em horas(h), ciclos (n) ou distância (km).

Depois que todas as informações forem feitas, aciona-se o botão “gráficos e cálculos”, para acessar a tela de configuração de saída, Figura 7. 12. As possibilidades de análise são as mesmas que estão disponíveis para os componentes, exceto a inclusão de sensor sobre o componente reduzido. Essa possibilidade ainda não foi implementada.

7.6 Configuração das saídas na forma de gráficos

A configuração das saídas dos cálculos na forma de gráficos tem o objetivo de proporcionar informações qualitativas e quantitativas sobre todos os itens que compõem um circuito de freio pneumático. A seleção do tipo de gráfico é feita através da tela de configuração de saída, Figura 7. 12, tanto para os componentes e sensores, como para os circuitos.

Os gráficos são construídos para representar as funções confiabilidade, não-confiabilidade, taxa instantânea de falha e densidade de probabilidade de falha, para componentes, sensores, componentes equivalentes e componentes reduzidos.

7.6.1 Escala de Weibull

Os gráficos obtidos na escala de Weibull são construídos sobre o papel probabilístico de Weibull (PPW), gerado pelo programa BRAKEREL, para cada gráfico traçado. Esse gráfico tem na ordenada a escala bi-logarítmica ($\ln.\ln$) para a confiabilidade (R) ou para a não-confiabilidade (F) e, na abcissa, a escala logarítmica (\ln) para o período de vida (x), em horas, ciclos ou distância percorrida. Devido a essas escalas, as funções são linearizadas, permitindo os projetistas fazerem projeções a “posteriori” dos itens que se está analisando.

O eixo da ordenada, na escala de Weibull, permite variar a confiabilidade (R) de 1% até 99,9999%. No eixo da abcissa a escala é móvel, e admite uma variação de 10 até 100.000.000 horas, ciclos, ou quilômetros. Para esse eixo e dentro desse campo de variação, o programa reconstrói a escala em função do período de vida que foi definido para a análise. Assume-se o período de vida que foi selecionado na Figura 7. 11 e Figura 7. 13 como o maior valor da escala. A partir desse valor o programa divide a escala em 6 graduações da escala logarítmica, como está mostrado na Figura 7. 14, no eixo da abcissa. Nessa figura pode ser observada essa sistemática, onde se apresenta o gráfico da função confiabilidade *versus* distância, na escala de Weibull.

Para a função não-confiabilidade as escalas da ordenada e da abcissa seguem a mesma rotina de cálculo que foi adotada para as escalas dos eixos da função confiabilidade.

Para facilitar a leitura dos dados pode-se obter os gráficos com ou sem grade. O botão grade, quando acionado, ativa as linhas da ordenada e da abscissa em todo o gráfico, como está mostrado na Figura 7. 14, reproduzindo o papel probabilístico de Weibull.

Os gráficos na escala de Weibull são os mesmo para os componentes, sensores, componentes equivalentes e componentes reduzidos. Para os componentes equivalentes pode-se traçar, independentemente, os gráficos do sensor, do componente e do próprio componente equivalente. Todos os gráficos possuem o campo “legenda do componente”, onde são recuperados os valores dos parâmetros de forma e das taxas de falha para os componentes e para os sensores. Aparecem inclusive, os valores que foram digitados através da tela de configuração de saída, Figura 7. 12.

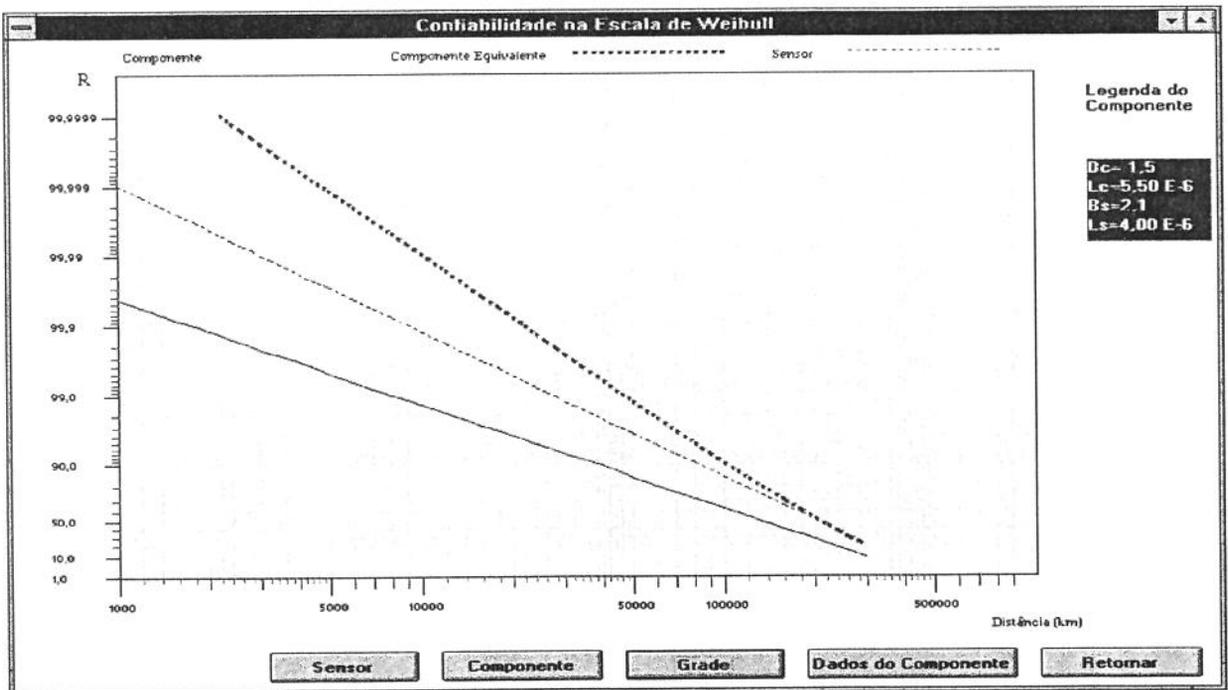


Figura 7. 14 Gráfico da função confiabilidade versus distância, para a escala de Weibull

O botão “dados do componente” acessa as tabelas que explicitam os valores da confiabilidade, da não-confiabilidade, da taxa instantânea de falha e da função densidade de probabilidade de falha para o componente, para o sensor, para o componente equivalente ou para o componente reduzido. Na tabela vem todos esses cálculos, para os períodos que estão destacados no eixo da abscissa..

7.6.2 Escala Linear

A construção dos gráficos na escala linear segue o mesmo roteiro utilizado para a escala de Weibull. Para a função confiabilidade variou-se o eixo da ordenada de 0 a 100%, como mostra a Figura 7. 15. A função não-confiabilidade tem, igualmente, o mesmo campo de variação.

Para as funções taxa instantânea de falha (tif) e densidade de probabilidade de falha (fdp), construiu-se uma escala variável para o eixo da ordenada, dado que os valores dessas funções, por serem exponenciais, são distribuídos num espectro muito amplo. A escala é construída a partir dos valores da taxa de falha e do período de vida do item que está sendo analisado. Com esses dados, o programa calcula o valor máximo da função densidade de probabilidade de falha, que determina, por sua vez, o primeiro ponto da escala, chamado de ponto de referência de escala. O tamanho do eixo da ordenada é fixo, está dividido em 15 partes iguais e foi definido em *pixels* de tela. Como a variação entre essas divisões no eixo é exponencial, foi definida também uma potência de escala caracterizada pelo expoente da taxa de falha característica do item.

A escala do eixo da abcissa, na escala linear, é a mesma para todas as funções confiabilísticas. O eixo é dividido em 10 campos iguais com 10 subdivisões em cada campo. Da mesma forma que para a escala de Weibull, o período de vida pode variar de 10 até 100.000.000 horas, ciclos ou quilômetros. Para facilitar a análise, o programa reconstrói a escala do eixo da abcissa, para cada período de vida selecionado na Figura 7. 11 e na Figura 7. 13.

As Figura 7. 15 e Figura 7. 16 mostram, respectivamente, as funções confiabilidade e densidade de probabilidade de falha para o componente equivalente, para o componente e para o sensor. Os gráficos podem ser construídos com grade (Figura 7. 15) ou sem grade (Figura 7. 16).

Especificamente para o gráfico da confiabilidade foi criada a opção de um “*zoom*” sobre a parcela de confiabilidade que fica entre 90% e 100%. Esse “*zoom*” está habilitado só para o componente, Figura 7. 17. O objetivo do “*zoom*” é ampliar a visão do analista sobre essa faixa de confiabilidade.

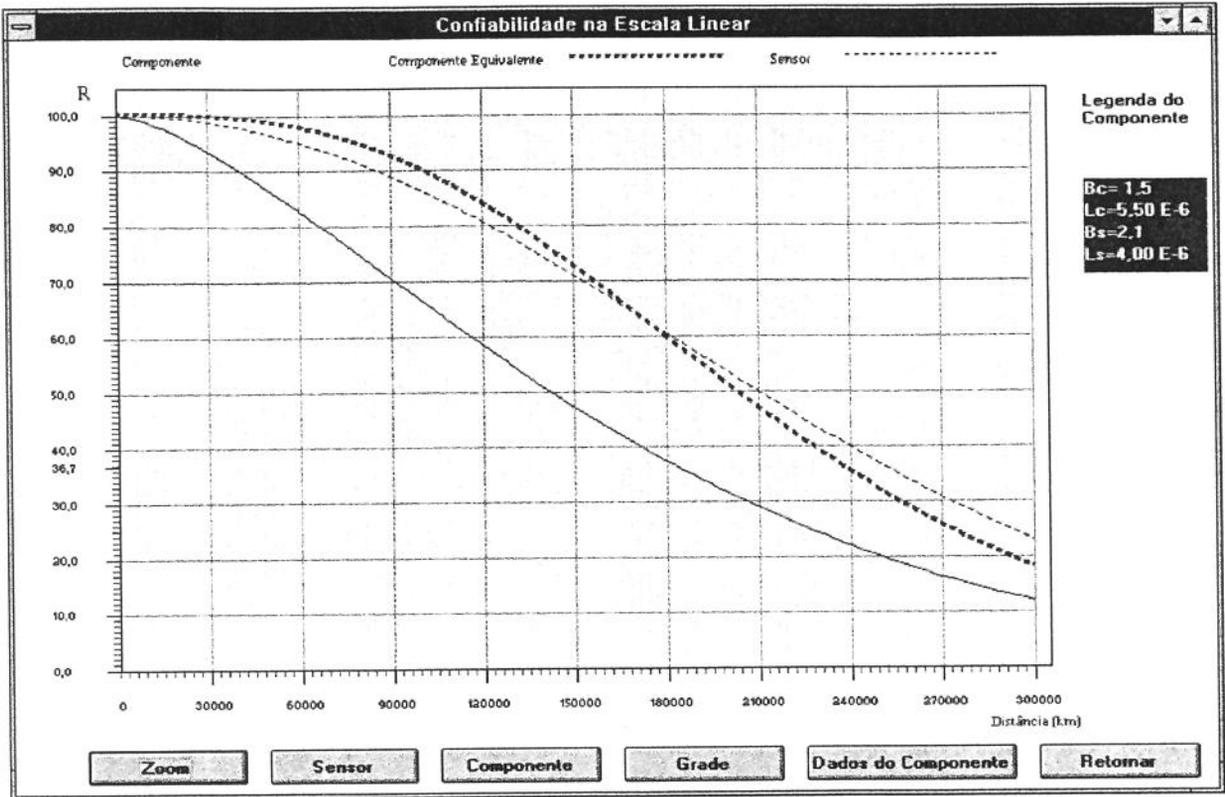


Figura 7. 15 Função confiabilidade na escala linear.

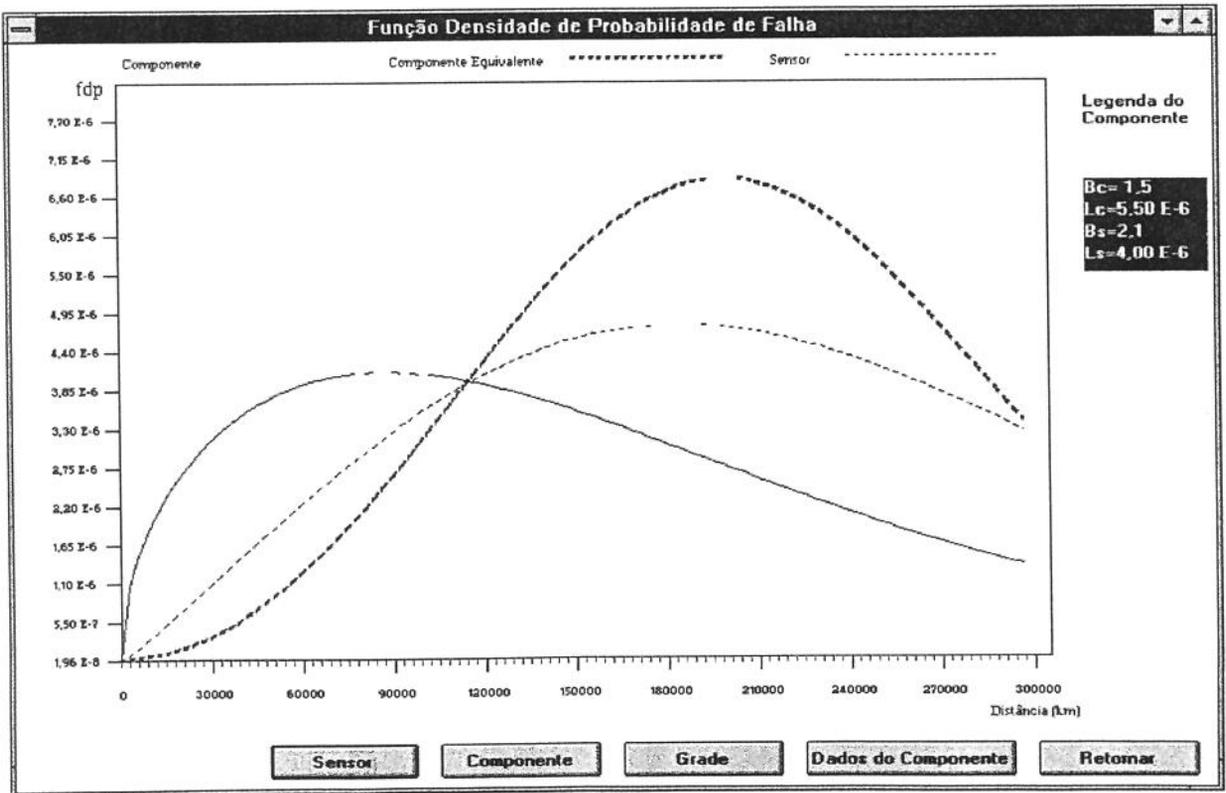


Figura 7. 16 Função densidade de probabilidade de falha na escala linear

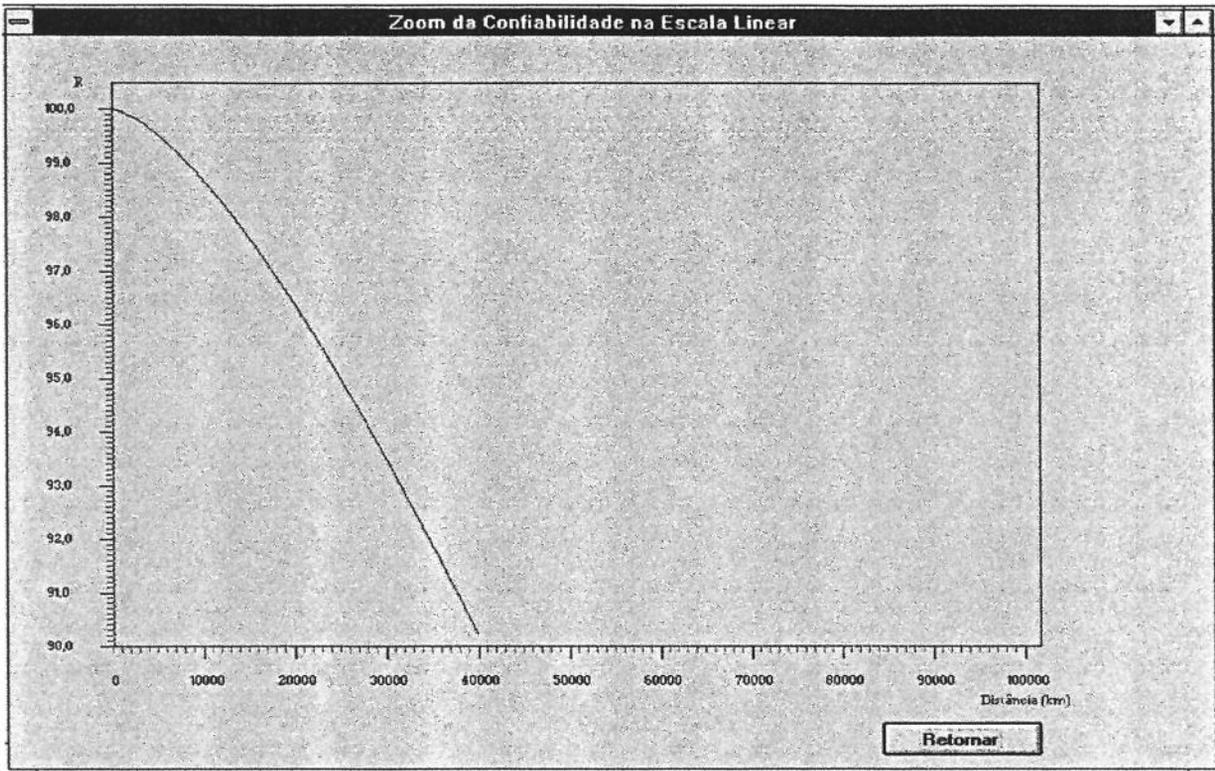


Figura 7.17 “Zoom” da função confiabilidade do componente

7.7 Configuração na forma de tabelas

As tabelas são mais apropriadas do que os gráficos para as análises quantitativas dos dados dos itens. Registram os valores da confiabilidade, da não-confiabilidade, da taxa instantânea de falha e da função densidade de probabilidade de falha para os pontos do período de vida que estão registrados no eixo da abcissa, tanto dos gráficos na escala de Weibull, Tabela 7. 2, quanto linear. Na tabela 7.2, tem-se os resultados dos cálculos do componente equivalente. Pode-se obter os mesmos resultados para o sensor através do botão “sensor”, ou para o componente sem sensor, através do botão “componente”. Além disso, mostra-se os valores da taxa de falha e do parâmetro de forma, calculados para o componente equivalente.

Para o componente reduzido, Tabela 7. 3, são destacados os dados do próprio componente reduzido, e os valores da taxa de falha e do parâmetro de forma, que foram calculados pelo programa. É mostrado também, no campo “composição”, o tipo de arranjo, o “nível”, a composição da árvore de falhas e os itens que constituem esse componente reduzido, nesse nível. Pelo botão “próximo nível”, pode-se conhecer os itens nos níveis subsequentes, ou seja, saber que itens se encontram dentro dos próximos componentes reduzidos. Pelo botão

“nível anterior” retorna-se à árvore de falhas. Os outros dados da tabela são os mesmos do componente.

Tabela 7. 2 Dados do componente equivalente na escala de Weibull.

Dados do componente, sensor e componente equivalente

Dados do Componente

Código: C01 Descrição: COMPRESSOR

Taxa de Falha: 5.50 x10⁻⁶ /km

Parâmetro de Forma: 1.5 Período: 300000 km

Dados do Sensor

Código SE1 Descrição: SENSOR DE TEMPERATURA

Taxa de Falha: 4 x10⁻⁶ Parâmetro de Forma: 2.1

COMPONENTE COM SENSOR REAL

Taxa de Falha Equivalente: 4,373 x10⁻⁶ Parâmetro de Forma Equivalente: 2.96

Tabela de Cálculo para o Componente Equivalente

km	R	F	tif	fdp
1000	0,9999999	0,0000001	3,06 E-10	3,06 E-10
5000	0,9999884	0,0000116	7,18 E-9	7,18 E-9
10000	0,9999028	0,0000972	2,80 E-8	2,80 E-8
50000	0,9863694	0,0136306	6,57 E-7	6,48 E-7
100000	0,8994722	0,1005278	2,56 E-6	2,30 E-6
500000	0,0111138	0,9888862	6,00 E-5	6,67 E-7

7.8 Comentário

O programa computacional BRAKEREL (*Brake Reliability Program*) foi programado em *Visual Basic for Windows*, versão 3.0, segundo os conceitos de programação orientada a objetos. O programa, embora específico para analisar as funções confiabilísticas em freios pneumáticos automotivos, foi estruturado para admitir a análise de outros sistemas. A estrutura de programação orientada a eventos facilita as implementações que se fizerem necessárias para incluir outras variáveis de análise que ainda não foram contempladas.

Do ponto de vista estrutural, o programa foi dividido em dois grupos. O grupo de banco de dados, onde são cadastradas todas as amostras, componentes, circuitos e geradas as composições dos arranjos que foram propostos no modelo confiabilístico. Já no grupo de

análise, se recupera todos os dados cadastrados e obtém-se os resultados dos cálculos na forma de gráficos e tabelas para a escala linear e de Weibull.

O desenvolvimento do programa seguiu a orientação delineada pela metodologia de análise da confiabilidade de sistemas de freios pneumáticos.

Tabela 7.3 Dados do componente reduzido na escala linear

Dados do componente, sensor e componente equivalente

Dados do Componente

Código: CRCG003 Descrição:

Taxa de Falha: 2.981 $\times 10^{-6}$ /km

Parâmetro de Forma: 1.596 Período: 100000 km

Nível 0 da árvore de composição

Nível Anterior	Próximo Nível
CRCG003	
----CRCG001	
----CRCG002	

Composição

Tipo de Arranjo: Série

2 itens bons em 2

Tabela de Cálculo para o Componente Reduzido

km	R	F	tif	fdp
10000	0,9964778	0,0035222	5,87 E-7	5,85 E-7
20000	0,9892581	0,0107419	8,87 E-7	8,78 E-7
30000	0,9792220	0,0207780	1,13 E-6	1,11 E-6
40000	0,9667383	0,0332617	1,34 E-6	1,30 E-6
50000	0,9520642	0,0479358	1,53 E-6	1,46 E-6
60000	0,9354111	0,0645889	1,71 E-6	1,60 E-6
70000	0,9169675	0,0830325	1,87 E-6	1,72 E-6
80000	0,8969098	0,1030902	2,03 E-6	1,82 E-6

Componente

Retornar

Capítulo 8

Estudo de Caso

8.1 Introdução

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a aplicação da metodologia proposta no capítulo 6. Na primeira parte do capítulo faz-se a apresentação do circuito a ser analisado relacionando todos os itens constitutivos. A seguir faz-se uma descrição resumida de cada item, destacando os pontos que são fundamentais para a análise confiabilística. Faz-se também a composição dos diversos itens em arranjos do tipo série e paralelos, gerando os componentes reduzidos. Essas composições são feitas para o circuito geral, para os subsistemas de atuação e para os grupos de função.

Na segunda parte do capítulo é utilizado o programa computacional BRAKEREL para cadastrar todos os itens que podem fazer parte de um circuito de freio pneumático. Faz-se também as composições de todos os bancos de dados requeridos para a análise. Por último utiliza-se o programa para gerar as saídas dos cálculos na forma de gráficos e de tabelas para componentes e componentes reduzidos.

8.2 Modelo físico

O modelo físico representa a maneira como estão distribuídos e interligados os componentes no circuito de freio.

Na Figura 8. 1 é mostrado o circuito de freio pneumático para ônibus ou caminhão, sem conexão para o reboque ou semi-reboque. Na Figura 8. 2 tem-se um desenho esquemático dos itens que constituem o freio mecânico, ou seja, os dispositivos que estão em contato com o cubo de rodas. O funcionamento do circuito e os níveis de pressão exigidos foram descritos no capítulo 5.

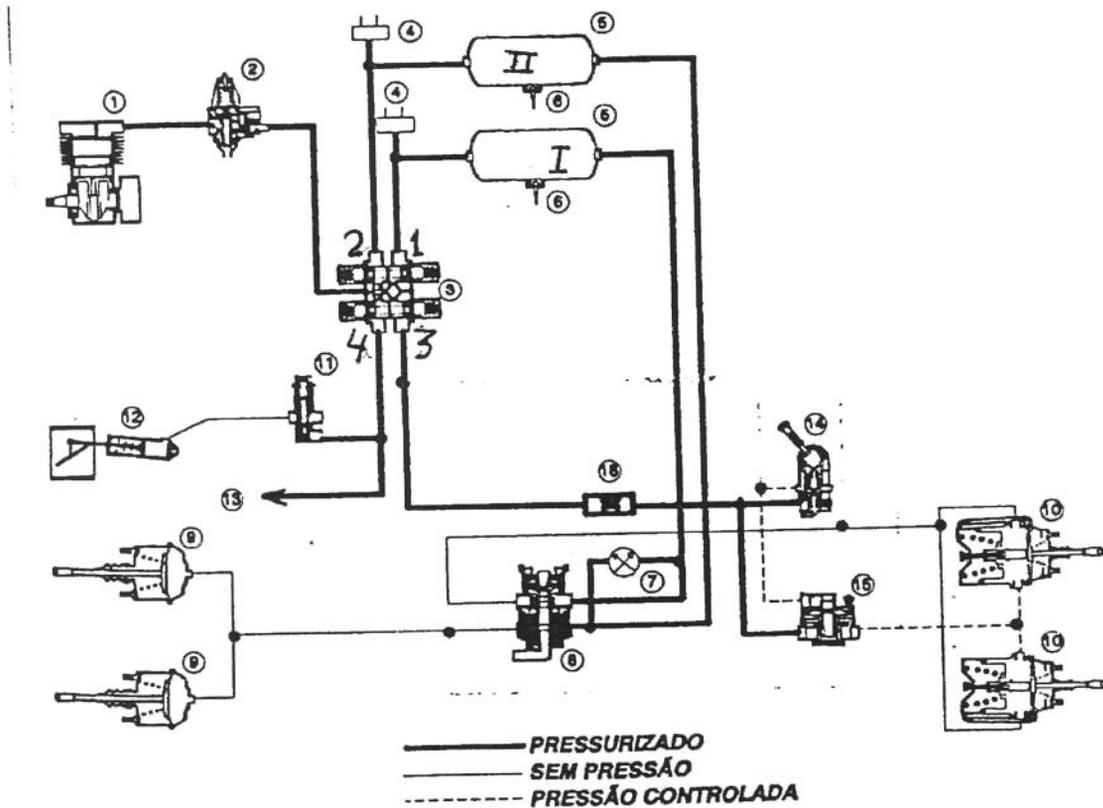


Figura 8. 1 Circuito de freio pneumático básico para caminhão ou ônibus, com dois eixos [35].

8.3 Identificação dos itens do sistema

8.3.1 Relação geral dos componentes que podem fazer parte de um circuito de freio

Na Tabela 8. 1 relacionam-se todos os componentes que podem fazer parte de um circuito de freio. O cadastramento de todos os componentes num banco de dados do programa

computacional BRAKEREL facilita a montagem de circuitos específicos, por tipo de veículos. Relacionam-se tanto os componentes do circuito do caminhão/ônibus quanto os do reboque e semi-reboque.

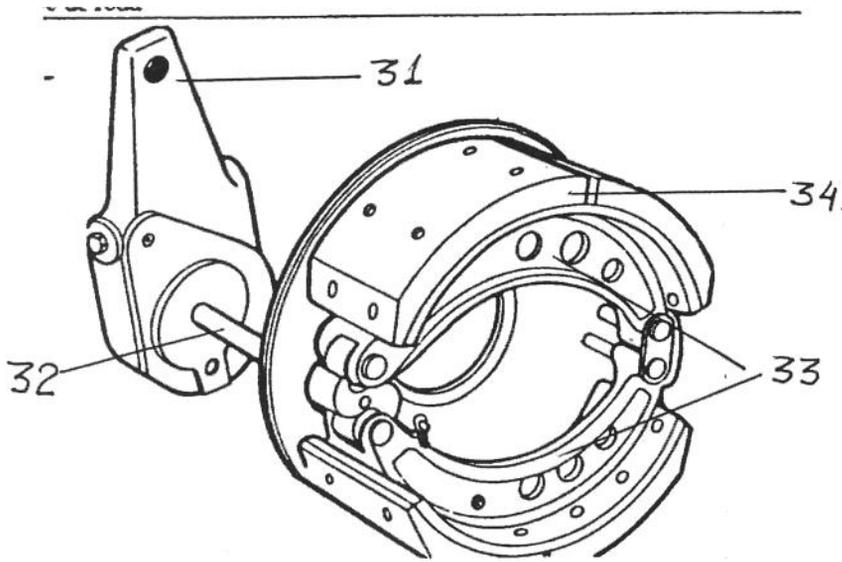


Figura 8. 2 Esquema básico do freio de sapatas

A coluna 1 da Tabela 8. 1 é usada para o número de ordem dos itens. Na coluna 2 é especificado o código do componente (CO), do sensor (SE) e do comutador (CM). Na coluna 3 é dado o nome para o item da coluna 2. Nas colunas 4 e 5 são explicitadas as taxas de falha e os parâmetros de forma de cada item da tabela. Os valores aqui colocados não foram obtidos experimentalmente; não são, portanto, valores verdadeiros. Foram simplesmente adotados.

Tabela 8. 1 Relação de todos os componentes que são utilizados para construir um circuito de freio pneumático. (* As taxas de falha e parâmetros de forma foram adotadas aleatoriamente)

BRAKEREL - Brake Reliability Program				
Relação dos itens que podem compor um circuito de freio pneumático				
Nº	Código de identificação	Nome do componente	Taxa de falha x 10⁻⁶/km *	Parâmetro de forma *
1	CO1	Compressor	2,0	1,5
2	CO2	Regulador de pressão	2,0	2,0
3	CO3 E	Entrada da Válv. de 4 circuitos	1,0	2,0
4	CO3.1	Válv.de 4 circuitos - saída circ. traseiro	1,0	2,0
5	CO3.2	Válv.de 4 circuitos- saída circ dianteiro	1,0	2,0

BRAKEREL - Brake Reliability Program

Relação dos itens que podem compor um circuito de freio pneumático

Nº	Código de identificação	Nome do componente	Taxa de falha $\times 10^{-6}/\text{km}^*$	Parâmetro de forma *
6	CO3.3	Válv. de 4 circuitos- saída circ. estac.	1,0	2,0
7	CO3.4	Válv. de 4 circuitos- saída circ. auxil.	1,0	2,0
8	CO04	Tomada de teste	1,0	2,0
9	CO5	Reservatório	1,0	3,5
10	CO6	Válvula de dreno manual	1,0	2,5
11	CO7	Manômetro	1,0	2,0
12	CO8D	Válv. pedal, circuito do eixo dianteiro	1,5	1,7
13	CO8T	Válv. pedal, circuito do eixo traseiro	2,0	1,5
14	CO9	Cilindro membrana	2,0	1,5
15	CO10	Cilindro "tristop" câmara pneumática	2,0	1,5
16	CO10 mola	Cilindro "tristop" câmara de mola	2,0	1,5
17	CO11	Válvula solenóide	1,0	2,0
18	CO12	Cilindro freio motor	1,0	1,8
19	CO13	dispositivos auxiliares	1,0	2,0
20	CO14	Válvula do freio de mão	1,0	1,8
21	CO15	Válvula relé	1,0	1,8
22	CO16	Válvula de duas vias	0,8	2,5
23	CO17	Válvula distribuidora	1,0	1,7
24	CO18	Válvula de retenção	0,8	2,5
25	CO19	Válvula freio reboque	1,5	1,7
26	CO20	Cabeça de acoplamento	1,0	2,0
27	CO21	Cabeça de acoplamento	1,0	2,0
28	CO22	Válvula descarga rápida	1,5	1,8
29	CO23	Válvula dreno automático	1,5	1,8
30	CO24	Válvula segurança	0,8	2,0
31	CO31	Alavanca de ajuste do freio	0,8	2,5
32	CO32	Eixo expansor das sapatas	0,5	3,0
33	CO33	Sapata de freio	0,5	2,5
34	CO34	Guarnição de freio	2,5	1,8
35	CO35	Cubo de roda	1,0	2,0

BRAKEREL - Brake Reliability Program				
Relação dos itens que podem compor um circuito de freio pneumático				
Nº	Código de identificação	Nome do componente	Taxa de falha x 10 ⁻⁶ /km [·]	Parâmetro de forma [·]
36	CO99	Tubos e conexões	1,0	2,0
37	CO100	conexão motor-compressor	1,0	2,0
38	COauxiliares	dispositivos pneumáticos diversos	1,0	2,0

8.3.2 Relação dos componentes para o circuito da Figura 8. 1 e Figura 8. 2

A partir da relação geral dos itens da Tabela 8. 1, podem ser montados circuitos específicos para o tipo de veículo. Na Tabela 8. 2 estão relacionados os componentes do circuito das figuras Figura 8. 1 e Figura 8. 1. Esse circuito pneumático é característico de veículos que não dispõem de acoplamento para o reboque. As alterações estão colocadas, basicamente, em função das cargas que atuam em cada eixo.

Os valores das taxas de falha e dos parâmetros de forma da Tabela 8. 2 foram, simplesmente, adotados. O objetivo foi gerar dados de entrada para resolver o problema proposto. Esses valores foram, contudo, adotados com a perspectiva de obter percentual de confiabilidade compatível com a expectativa explicitada no trabalho de Brunner[22] para sistemas vinculados à segurança veicular, descritos no capítulo 2. Os valores experimentais não estavam disponíveis para utilização neste trabalho.

Tabela 8. 2 Relação de todos os componentes que são utilizados para constituir o circuito de freio pneumático da Figura 8. 1 e Figura 8. 2. (* As taxas de falha e parâmetros de forma foram adotadas aleatoriamente).

BRAKEREL - Brake Reliability Program				
Componentes do circuito de freio pneumático - Figura 8. 1 e Figura 8. 2				
Nº	Código de identificação	Nome do componente	Taxa de falha x 10 ⁻⁶ /km [·]	Parâmetro de forma [·]
1	CO1	Compressor	2,0	1,5
2	CO2	Regulador de pressão	2,0	2,0
3	CO3 E	Entrada da Válv. de 4 circuitos	1,0	2,0
4	CO3.1	Válv. de 4 circuitos - saída circ. traseiro	1,0	2,0

BRAKEREL - Brake Reliability Program

Componentes do circuito de freio pneumático - Figura 8.1 e Figura 8.2

Nº	Código de identificação	Nome do componente	Taxa de falha $\times 10^{-6}/\text{km}^*$	Parâmetro de forma *
5	CO3.2	Válv. de 4 circuitos- saída circ dianteiro	1,0	2,0
6	CO3.3	Válv. de 4 circuitos- saída circ. estac.	1,0	2,0
7	CO3.4	Válv. de 4 circuitos- saída circ. auxili.	1,0	2,0
8	CO4	Tomada de teste	1,0	2,0
9	CO5	Reservatório	1,0	3,5
10	CO6	Válvula de dreno manual	1,0	2,5
11	CO7	Manômetro	1,0	2,0
12	CO8D	Válvula pedal circuito do eixo dianteiro	1,5	1,7
13	CO8T	Válvula pedal circuito do eixo traseiro	1,5	1,7
14	CO9	Cilindro membrana	2,0	1,5
15	CO10	Cilindro "tristop" câmara pneumática	2,0	1,5
16	CO10 mola	Cilindro "tristop" câmara de mola	2,0	1,5
17	CO11	Válvula solenóide	1,0	2,0
18	CO12	Cilindro freio motor	1,0	1,8
19	CO13	dispositivos auxiliares	1,0	2,0
20	CO14	Válvula do freio de mão	1,0	1,8
21	CO15	Válvula relé	1,0	1,8
22	CO18	Válvula de retenção	0,8	2,5
23	CO31	Alavanca de ajuste do freio	0,8	2,5
24	CO32	Eixo expansor das sapatas	0,5	3,0
25	CO33	Sapata de freio	0,5	2,5
26	CO34	Guarnição de freio	2,5	1,8
27	CO35	Cubo de roda	1,0	2,0
28	CO99	Tubos e conexões	1,0	2,0
29	CO100	Conexão motor-compressor	1,0	2,0
30	COauxiliares	dispositivos pneumáticos diversos	1,0	2,0

8.3.3 Descrição dos componentes do circuito de freio pneumático da Tabela 8.2 a serem usados no modelo confiabilístico

Essa descrição é sucinta e aborda os aspectos funcionais do componente, ou seja, aqueles que vão influir no estudo da confiabilidade. Visa a uniformização das informações facilitando a compreensão do circuito e, por sua vez, a análise confiabilística.

1 - COMPRESSOR [código:CO01]: É a fonte geradora da energia pneumática utilizada no sistema de freio. Efetua a captação do ar da atmosfera, através das válvulas de admissão, filtra-o e o acumula sob pressão nos reservatórios.

Pode ser de um ou de dois êmbolos. A especificação de um ou de outro vai depender do volume de ar requerido na unidade de tempo.

Os compressores são acionados direta e continuamente pelo motor do veículo. Conectam-se a este, em alguns casos, através de correias, e em outros casos, por engrenagens ou pela montagem de acoplamentos diretamente ao eixo de comando de válvulas.

Embora estejam continuamente em movimento, boa parte do tempo os compressores trabalham livres de pressão. Esse controle é feito pela válvula controladora de pressão, que gerencia a entrada de ar para o circuito. Quando a pressão no circuito cair abaixo de 7,5 bar, a válvula controladora atua sobre o mecanismo que direciona o ar para o circuito, chamado aqui de fase de trabalho. Quando a pressão atinge 8,5 bar, a válvula controladora, novamente, atua sobre o mecanismo que libera o ar para a atmosfera. O limite inferior e superior de pressão de trabalho sofre pequenas variações de um fabricante para outro, ou de uma montadora para outra.

2 - REGULADOR DE PRESSÃO[código:CO02]: A válvula reguladora de pressão é também chamada de válvula governadora ou governador. Em alguns casos ela está diretamente acoplada ao compressor e, em outros, ela está instalada numa posição remota, ligando-se ao compressor via tubulação.

Controla a pressão do ar no circuito, atuando sobre o mecanismo de decompressão existente no cabeçote do compressor, nos casos em que está diretamente acoplada a ele. Quando instalada na linha pneumática, o ar é liberado para atmosfera pela própria válvula. A pressão máxima de corte (cut-out) gira em torno de 8,5 bar.

A pressão no circuito diminui à medida que o freio é acionado. Quando essa pressão atinge uma faixa de 5% a 15% menor do que a pressão de acumulação (em torno de 7,5bar), diz-se que a condição de pressão mínima (cut-in) é atingida. Nessa condição, é reiniciado o processo de alimentação do circuito.

A válvula reguladora de pressão possui também uma tomada para receber pressão para o sistema através de uma fonte externa e fornecer pressão do sistema ao exterior. Há uma outra saída que é utilizada para efetuar o comando do dreno automático, instalado, normalmente, no reservatório primário, também chamado de reservatório úmido.

3 - VÁLVULA PROTETORA DE 4 CIRCUITOS[código:CO03]: É utilizada em sistemas de freio pneumático com 4 circuitos independentes. Tem a finalidade de, em caso de falha de um deles, assegurar a pressão de segurança nos circuitos intactos. Essa pressão, regulada normalmente para 5,0 bar, é definida como a pressão que deve permanecer nos circuitos intactos. Evidentemente, nessa condição o compressor deve funcionar ininterruptamente.

Embora tenha um único corpo, a válvula protetora de 4 circuitos funciona como se fossem quatro válvulas independentes, com uma entrada comum e quatro saídas distintas. Existe inclusive uma seqüência de abertura das válvulas de saída, controladas por molas que proporcionam pequenos diferenciais de pressão. A válvula exige uma pressão inicial mínima que irá alimentar, primeiramente, os circuitos de freio traseiro 21 e freio dianteiro 22, para posteriormente abrir os circuitos para freio de estacionamento 23, freio motor e acessórios 24. Assim, garante a recuperação da pressão nos reservatórios mais rapidamente.

A falha de um dos circuitos gera normalmente a perda de ar para a atmosfera. Esse vazamento produz a perda de pressão em todo o circuito. Nos circuitos intactos estabelece-se então a pressão de segurança que, dependendo da regulagem, é igual à pressão exercida pela mola no circuito defeituoso, em torno de 5,0 bar. A pressão permanece estável, nesse nível, haja vista que o ar em excesso, produzido pelo compressor, é descarregado para a atmosfera através do circuito defeituoso.

4 - TOMADA DE TESTE[código:CO04]: É chamada de tomada de medição, quando instalada em pontos estratégicos para verificação dos níveis de pressão no circuito. Em outros pontos ela permite a saída para uso em calibração de pneus, atividades de limpeza ou alimentação para outro veículo.

5 - RESERVATÓRIO[código:CO05]: É o dispositivo onde o ar é acumulado, sob pressão. Em alguns circuitos tem-se um reservatório, chamado de primário, colocado antes da válvula

de 4 vias que serve, basicamente, para condensar a umidade e fazer decantar gotículas de óleo e impurezas contidas no ar. Nele, na maioria das vezes, é instalada uma válvula de dreno automático.

Nos reservatórios, instalados nas saídas 1 e 2 da válvula de 4 vias, é armazenado, sob pressão, o ar que irá alimentar os circuitos para o eixo traseiro e para o eixo dianteiro do veículo. Os reservatórios são dimensionados para acumular e comandar o ar necessário a todos os itens que estão acoplados nesses circuitos, a tantas aplicações quantas forem as recomendações da Norma Brasileira NBR 10.969 da ABNT[15].

6 - VÁLVULA DE DRENO MANUAL[código:CO06]: É usada para fazer o escoamento da água condensada, eventuais resíduos de óleo ou partículas sólidas, acumuladas nos reservatórios. A operação de drenagem, feita manualmente, é fundamental para garantir o volume de ar requerido para o número de aplicações do freio, recomendado por norma.

7 - MANÔMETRO[código:CO07]: É instrumento encarregado de medir a pressão existente nos circuitos primários. Essas informações são lidas na cabine do motorista.

8 - VÁLVULA DE PEDAL[código:CO08]: É chamada também de válvula de freio de serviço, válvula de dois circuitos para o freio de serviço ou válvula de controle de pressão do freio de serviço. Está ligada mecanicamente ao pedal de frenagem. Ao ser pressionada pelo motorista, libera a passagem de ar dos reservatórios para as câmaras de freios instaladas nos eixos traseiros e no eixo dianteiro do veículo. A pressão do ar liberado está relacionada com a intensidade com que o motorista aciona o pedal de freio. A interrupção do fluxo de ar acontece assim que for interrompida a ação sobre o pedal.

Essa válvula é de corpo duplo:

- o corpo superior está conectado com o subcircuito de freio dos eixos traseiros;
- o corpo inferior com o subcircuito do freio do eixo dianteiro.

A ação de abertura pneumática ocorre primeiro na passagem conectada ao subcircuito dos freios dos eixos traseiros, com um controle de pressão de aproximadamente 0,4 bar maior que a pressão liberada para o subcircuito de freio dianteiro. Isso faz com que a ação de frenagem ocorra primeiro e mais intensamente nas rodas traseiras[3]. Sobre esse eixo tem-se maior carregamento e mais pneus em contato com o solo, proporcionando dessa forma maior capacidade de frenagem. No eixo dianteiro o importante é priorizar a dirigibilidade. Para

veículos de dois eixos a distribuição de frenagem fica entre 60% a 70% para o eixo traseiro [37,92].

9 - CILINDRO DE MEMBRANA [código:CO09]: Cilindro, ou câmara de freio, instalado em cada ponta do eixo dianteiro do veículo, é usado única e exclusivamente para aplicação do freio de serviço. Ele recebe o ar do reservatório através do pórtico inferior da válvula de pedal, que faz o controle da pressão. Essa pressão atua sobre a superfície do diafragma, gerando a força necessária para o deslocamento da haste de freio. Quando o pedal de freio é desaplicado, o ar é exaurido através de válvulas relé ou válvulas de descarga rápida para a atmosfera. Uma mola de retorno faz com que o diafragma e a haste de freio voltem à posição de repouso, desaplicando o freio.

10 - CILINDRO “TRISTOP” [código:CO10]: A denominação de “*Tristop*” é usada nos catálogos da Wabco[37], mas esse cilindro é conhecido também por cilindro de freio de câmara dupla[59,60] ou cilindro de freio combinado [92], haja vista que é constituído de duas câmaras:

- câmara para atuação do freio de serviço, totalmente pneumática;
- câmara para atuação do freio de estacionamento ou emergência.

Operam em cada rodado do eixo traseiro do veículo.

A câmara do freio de serviço tem os mesmos componentes e a mesma função da utilizada no eixo dianteiro. Normalmente, ela tem dimensões maiores, ou seja, diafragma com maior área, gerando assim maior força sobre a haste de acionamento do freio mecânico.

A câmara de freio de estacionamento, chamada também de freio de mola ou “*spring brake*”, possui um mola que é mantida comprimida pneumaticamente durante o período em que o veículo se encontra em movimento. A aplicação do freio ocorre mecanicamente pela ação da mola, à medida que diminui a pressão do ar na câmara. Nessa situação a mola helicoidal é distendida acionando o freio, na condição de emergência ou de estacionamento. Na condição de emergência essa ação deve ocorrer automaticamente, à medida que houver queda de pressão pneumática no sistema. Nos circuitos de ônibus, recomenda-se instalar uma válvula de proteção para proteger o freio contra a ação repentina do freio de emergência. Essa ocorrência pode levar ao travamento das rodas traseiras, o que geraria problemas de dirigibilidade.

Nessa câmara é instalado, ainda, um dispositivo para fazer a compressão mecânica da mola para desaplicação manual do freio de mola. Esse dispositivo constitui-se de um conjunto de porca e parafuso, que ao ser acionado proporciona a compressão da mola helicoidal, liberando totalmente o freio de estacionamento.

O freio de emergência, por ser mecânico, funciona como uma redundância ativa para o caso de falha catastrófica, e passiva para o caso de falha paramétrica.

Na condição de freio de emergência o motorista exerce a função de comutador, atuando sobre o freio de emergência através da válvula relé. Quando a falha é paramétrica, ou seja quando o circuito vai perdendo pressão gradativamente, a mola se distende e atua sobre o freio proporcionalmente à diminuição da pressão. Conforme os requisitos, definidos por norma para o freio de estacionamento, expostos no capítulo 5.4. O freio de estacionamento na condição de freio emergência não substitui totalmente o freio de serviço. Por isso essa redundância é apenas parcial.

11 - VÁLVULA SOLENÓIDE [código:CO11]: Sob o comando elétrico essa válvula conecta a linha de serviços ao cilindro de acionamento do freio motor. A pressão do ar desloca o êmbolo do cilindro que gira a válvula borboleta, obstruindo a saída dos gases de combustão. É nessa operação que ocorre a frenagem do veículo pelo motor; por isso, é chamado de freio motor.

12 - CILINDRO DE ACIONAMENTO DO FREIO MOTOR [código: CO12]: A pressão do ar na câmara do cilindro desloca o êmbolo que fecha a borboleta de escape de gases queimados para a descarga.

13 - AUXILIARES [código:CO13]: Essa saída é para fazer acionamentos diversos, tais como dispositivos de abertura e fechamento de portas, dispositivos para limpeza, buzina etc.

14 - VÁLVULA FREIO DE MÃO [código:CO14]: Também chamada de válvula de freio de estacionamento ou de suprimento, fica localizada, normalmente, na cabina do veículo. A sua função é liberar a pressão pneumática da câmara do freio de mola, através da válvula de alívio ou válvula relé. Pode ser operada por alavanca, botão ou cabo de aço (diretamente ou por controle remoto), a fim de aplicar ou desaplicar o freio de estacionamento[84]. Em alguns veículos ela é do tipo acionado-liberado. Para a maioria dos veículos nacionais, ela é projetada para ter aplicação gradual servindo, assim, para atuar como freio de emergência. Ela faz a comutação do freio de serviço, que é pneumático, pelo freio de emergência, mecânico.

A válvula do freio de mão fica normalmente aberta, ou seja, conecta as câmaras dos cilindros de freio de mola diretamente com o circuito de pressão. Sua atuação significa interromper o fluxo do ar, ao mesmo tempo que aciona as válvulas relé, liberando todo ou parte do ar da câmara. Dessa forma a força da mola atua sobre a haste da câmara de freio, que proporciona o contato das sapatas contra o cubo de roda, mantendo o veículo frenado.

15 - VÁLVULA RELÉ [código:CO15]: É normalmente instalada em cada eixo onde existe freio de estacionamento. Tem a função de produzir um acionamento mais rápido, diminuindo o tempo de resposta, com economia de ar[37]. Na ação de descarga ela se comporta como se fosse uma válvula de alívio rápido. Algumas válvulas relé são dotadas, também, de acionamento elétrico.

31 - ALAVANCA DE AJUSTE DO FREIO [código:CO31]: É a peça que conecta a haste de pressão da câmara de freio ao eixo expensor das sapatas. Normalmente é provida de um dispositivo de ajuste, manual ou automático, usado para compensar folgas provocadas pelo desgaste das guarnições.

32 - EIXO EXPANSOR DA SAPATA [código:CO32]: É o eixo provido de dispositivo que, através do movimento torcional, movimenta as sapatas contra as paredes do tambor. A forma mais usada desse elemento expensor é o “came S”.

33 - SAPATAS DE FREIO [código:CO33]: São estruturas de aço, montadas em uma das extremidades, através de pinos de ancoragem que, por sua vez, estão presos aos chamados pratos de apoio ou aranha. Esses pinos funcionam como eixos sobre os quais as sapatas se movimentam. A outra extremidade, contendo roletes de pressão, apoia-se pela ação de molas ao elemento expensor (came S), que movimenta as sapatas contra o tambor.

As sapatas, dependendo da posição de montagem, são identificadas como sapatas primárias e secundárias. Sobre a sapata primária atua o momento torçor, gerado pelo “came S”, mais o momento de atrito, devido ao movimento do cubo. Sobre a sapata secundária atua o mesmo momento torçor, só que nela o momento de atrito é negativo. Esse diferencial de pressão tem reflexos sobre o desgaste das guarnições.

34 - GUARNIÇÃO DE FREIO [código:CO34]: As características mais importantes da guarnição são o coeficiente de atrito e a estabilidade desse atrito dentro da temperatura de trabalho. Além dessas características, é requerido da guarnição de freio (lonas de freio) baixo coeficiente de dilatação, pouca sensibilidade à umidade, vida longa, estabilidade operacional; deve, operar sem ruído ou odor e não riscar o tambor[36,70,85]. O coeficiente de atrito oscila

entre 0,3 e 0,43. O uso de uma guarnição com alto coeficiente de atrito pode resultar em um freio “violento”, com excessiva sensibilidade ao pedal, ao passo que uma guarnição com baixo coeficiente de atrito dificulta a frenagem e exige, além disso, muito esforço no pedal e conseqüentemente nos outros itens do sistema.

35 - CUBO DE RODA [código:CO35]: É um componente metálico, contendo no lado interno as pistas de atrito de frenagem e no lado externo do cubo o acento para a montagem dos pneus.

99 - TUBULAÇÕES E CONEXÕES [código: CO99]: São de metal, borracha ou plástico. Neste trabalho elas serão tratadas como um único item.

100 - CONEXÃO MOTOR - COMPRESSOR [código:CO100]: A conexão entre o motor e o compressor é feita por meio de correia, engrenagem ou acoplamento. A opção por um ou por outro depende, basicamente, do fabricante.

MOTOR - É a fonte de energia que proporciona o acionamento de todo o sistema de freio pneumático. A falha do motor gera a chamada falha de modo comum. O ar acumulado nos reservatórios responde, segundo a norma, por até 5 ações de frenagem (5 acionamentos do pedal). Posteriormente, será necessário utilizar o freio de emergência.

SINALIZAÇÃO e ALERTA - Esses itens estão associados a luzes e lanternas de freio. Não contribuem para a frenagem do veículo; estão vinculados à comunicação externa do veículo com o meio e não com a desaceleração ou distância de parada.

8.4 Modelo confiabilístico

O modelo confiabilístico deve representar o modelo físico. Além disso deve ser montado a partir de recomendações normatizadas. As normas determinam as condições de funcionamento ideal e as condições de falha do circuito de freio pneumático. Por exemplo para o caso do freio de serviço, a norma brasileira NBR 10967 [13] explicita as condições mínimas requeridas para a frenagem em função da distância de parada ou em função da desaceleração média do veículo. Na condição de teste (a pressão deve-se manter em 6,5bar NBR 10968[14]) a válvula de 4 vias, por exemplo, atua como 4 válvulas independentes e arranjadas em série. A pressão de serviço (é variável de 7,0 até 9,0, dependendo do fabricante) é controlada pela

válvula controladora de pressão ou governador. Fora dessa faixa de pressão o circuito de freio será considerado em “falha”.

O modelo confiabilístico foi elaborado tendo por base essas condições. Ressalta-se que os arranjos foram construídos considerando que o circuito de freio será “bom”, se garantir a frenagem do veículo dentro da distância de parada ou proporcionar a desaceleração, que é designada pela norma NBR 10967[13], para aquele veículo. Evidentemente, outras variáveis relativas ao veículo como um todo contribuem para a frenagem, mas não influem na construção do modelo confiabilístico.

O modelo confiabilístico foi montado para analisar o circuito de freio da Figura 8. 1 e Figura 8. 2, sob três aspectos:

- modelo confiabilístico para o circuito geral (CG);
- modelo confiabilístico para os subsistemas ou subcircuitos de “atuação”:

Subsistema de “atuação” Pneumática (SP)

Subsistema de “atuação” Hidráulica (SH)

Subsistema de “atuação” Mecânica (SM)

Subsistema de “atuação” Elétrica (SE)

Subsistema de “atuação” eletrônica (ST)

- modelo confiabilístico para os grupos de função:

Grupo Conexão Motor-Compressor (GMC)

Grupo Gerador de Energia (GGE)

Grupo Acumulador de Energia (GAE)

Grupo de Válvulas de Acionamento (GVA)

Grupo de Controle e Alerta (GCA)

Grupo de Freio Auxiliar (GFA)

Grupo do Eixo Dianteiro (GED)

Grupo do Eixo Traseiro (GET)

Grupo do Eixo da Carreta (GEC)

Relação Pneu-Solo (RPS).

Os componentes serão arranjados em componentes reduzidos (CR). O próprio programa BRAKEREL vai atribuir-lhes um código composto das letras CR, mais as letras iniciais do subsistema ou grupos a que pertencem e um número de ordem. Esse mesmo código deve e será utilizado na montagem do modelo confiabilístico.

8.4.1 Modelo confiabilístico para o circuito principal

O arranjo dos componentes do circuito de freio, segundo o modelo confiabilístico proposto, está apresentado na Figura 8. 3. A composição dos componentes reduzidos a partir dessa figura pode tornar-se complexa, principalmente para circuitos com muitos componentes. Por isso optou-se por dividir o circuito geral em subcircuitos, que serão apresentados nas próximas figuras. A partir delas será feita a composição dos componentes reduzidos para o circuito geral (CRCG). Dessa forma obtém-se, também, um componente reduzido para cada subcircuito.

A Figura 8. 4 mostra o modelo confiabilístico simplificado. Nesse modelo tem-se os componentes que fazem a geração da pressão pneumática, ou seja, o compressor CO1 e a válvula reguladora de pressão CO2. O componente CO99 representa todas as conexões e tubulações utilizadas e o componente CO100 é a conexão entre o motor e o compressor. O motor, os pneus e as condições do solo não entram na avaliação da confiabilidade.

Na Figura 8. 4, os componentes CO100 e CO99 são arranjados em série para o CRCG001, e os componentes CO1, CO2 e CO3E são arranjados para o CRCG002. Os componentes reduzidos são, novamente, arranjados para o CRCG003. Essa sistemática de composição dos componentes em componentes reduzidos será utilizada a fim de sintetizar o circuito geral num único componente reduzido. O mesmo será feito para os sistemas de atuação e para os grupos de função.

Os componentes são arranjados segundo a combinação série ou paralela. Para tanto, aos componentes selecionados (que estão sombreados) atribui-se um novo código, chamado de CRCG (Componente Reduzido do Circuito Geral) e o número de ordem de sua constituição.

Assim fica destacada a composição utilizada, facilitando a análise dos dados. Essa seqüência de numeração deve ser obedecida para equivaler à seqüência que será editada pelo programa BRAKEREL, quando houver a composição dos arranjos.

Embora os subcircuitos estejam montados de forma paralela, não são assim interpretados para a montagem do modelo confiabilístico. Os subcircuitos dianteiro e traseiro formam o chamado freio de serviço. O subcircuito do freio de estacionamento/emergência tem uma particularidade. Quando o veículo está se deslocando, é chamado de freio de emergência. Se houver perda de pressão no circuito, haverá atuação mecânica dos freios, através das molas instaladas nas câmaras do cilindro de freio, caracterizando, assim, redundância ativa. Elas são dimensionadas, segundo a norma NBR 10.967[13], para gerar uma desaceleração de $2,2\text{m/s}^2$, contra $5,5\text{m/s}^2$ dos freios de serviço. Por isso não podem ser consideradas como redundância ativa plena dos freios de serviço, dado que são projetados para proporcionarem uma desaceleração que corresponde à metade desses. Quando o veículo está parado é chamado de freio de estacionamento.

MODELO CONFIABILÍSTICO DO CIRCUITO DE FREIO PENUMÁTICO AUTOMOTIVO

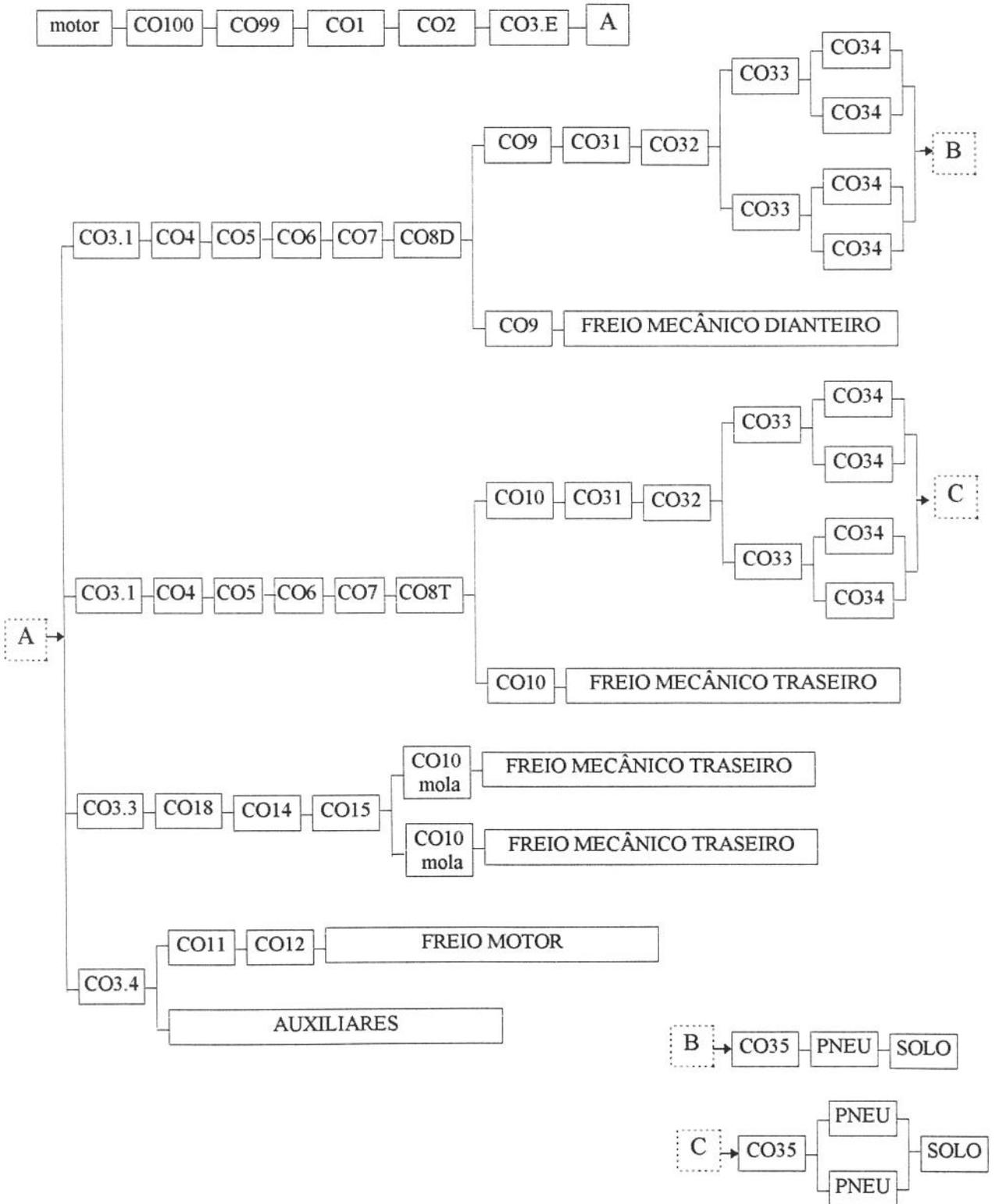


Figura 8. 3 - Modelo confiabilístico completo para o freio pneumático básico de caminhão e ônibus (Figura 8. 1), incluindo o freio de tambor (Figura 8. 2).

MODELO CONFIABILÍSTICO DO CIRCUITO DE FREIO PNEUMÁTICO AUTOMOTIVO

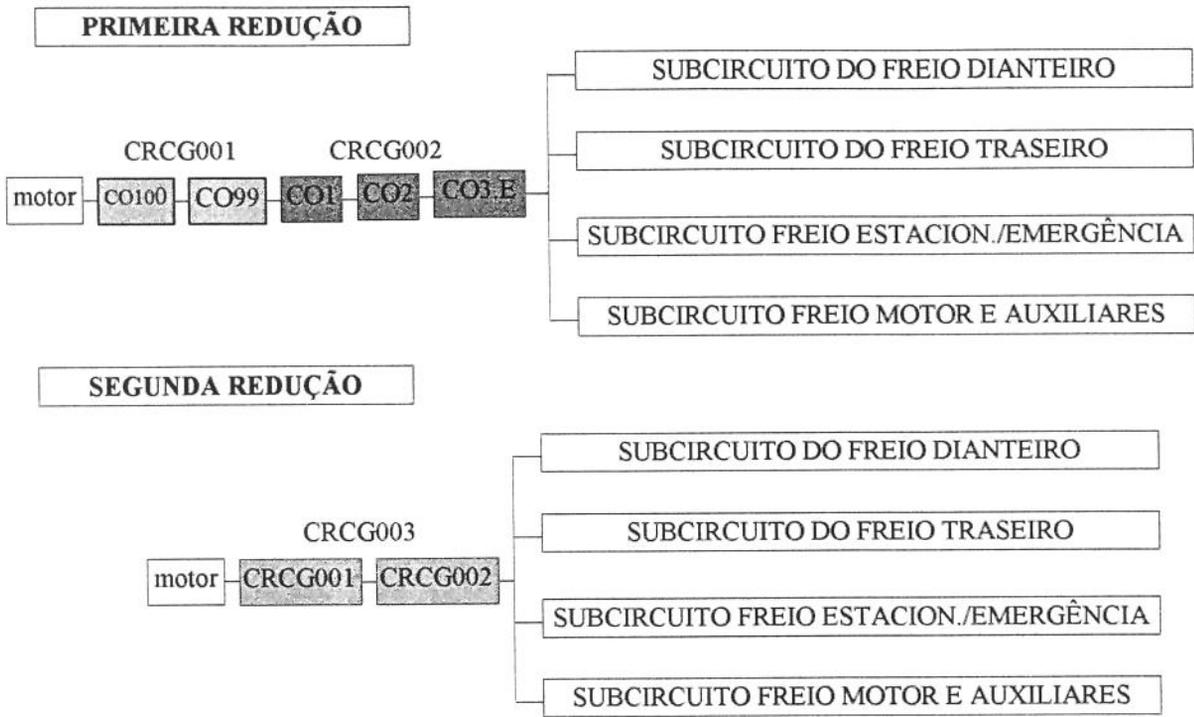


Figura 8. 4 Síntese do modelo confiabilístico para o circuito de freio pneumático.

A utilização do freio motor, de forma apropriada, pode contribuir para aumentar a vida dos componentes do circuito, principalmente daqueles que executam a ação de frenagem através do atrito.

Vale observar que, devido às condições estabelecidas anteriormente, todos os arranjos da composição são do tipo série, mesmo aqueles componentes que no modelo estão postos na forma paralela. Na última redução do modelo confiabilístico geral, é feita uma observação quanto à composição dos subcircuitos de freios de emergência e motor com os subcircuitos de freios de serviço.

8.4.1.1 Composição dos componentes para o subcircuito do freio dianteiro

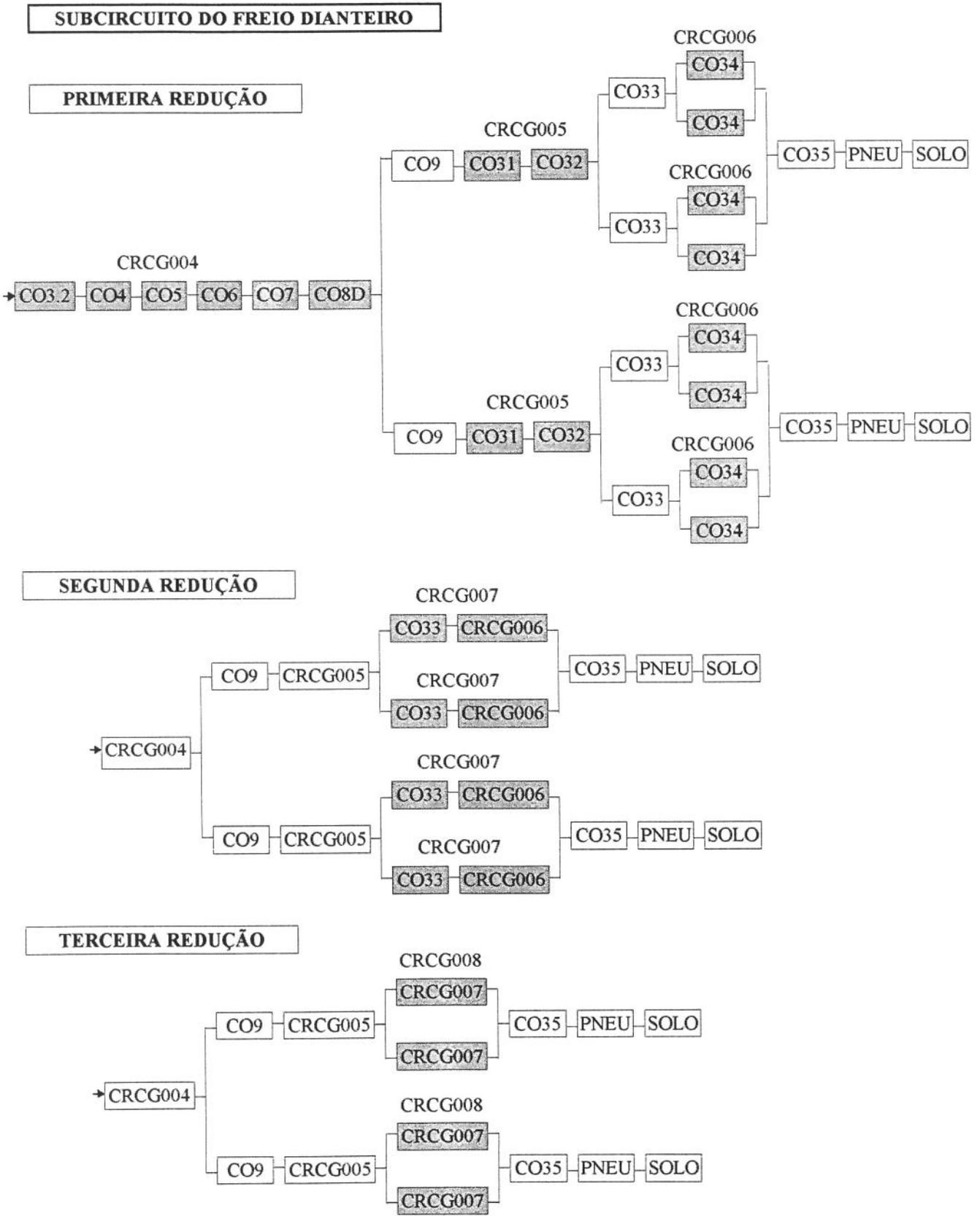


Figura 8. 5 Sequência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito dianteiro

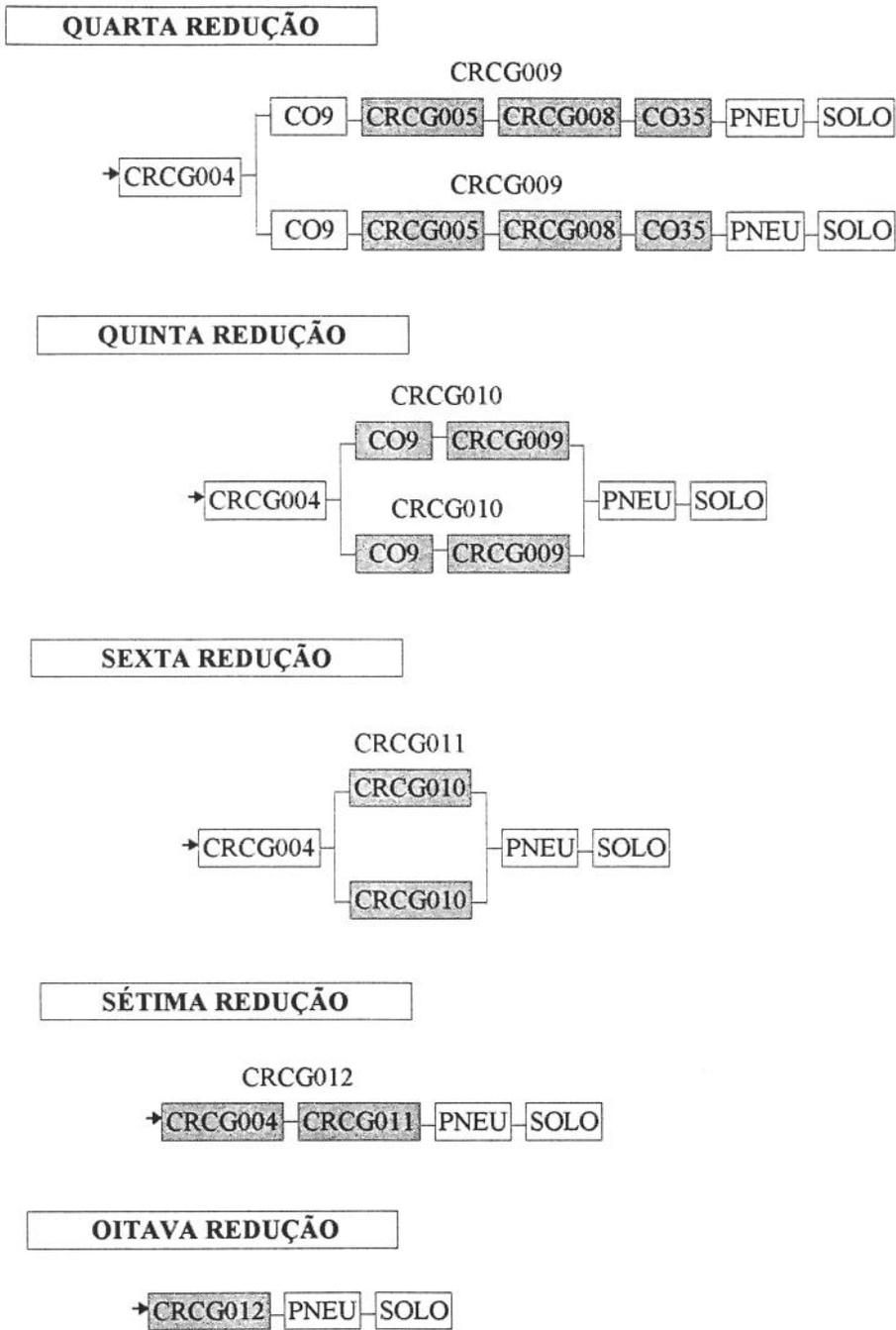


Figura 8.5: (continuação) Seqüência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito dianteiro.

O componente reduzido (CRCG009) representa o conjunto de componentes que constitui a atuação mecânica. Esse componente fica entre o cilindro pneumático (CO9) e o cubo de roda. Como os componentes de atuação mecânica são os mesmos para todas as rodas, eles serão representados nos outros subcircuitos pelo componente reduzido CRCG009.

Evidentemente, só ocorrerão mudanças se houver variações nas características dos componentes que interfiram nas taxas de falha e nos parâmetros de forma dos mesmos.

O componente reduzido (CRCG12) é o componente síntese do subcircuito do freio de serviço do eixo dianteiro.

8.4.1.2 Composição dos componentes do subcircuito do freio traseiro

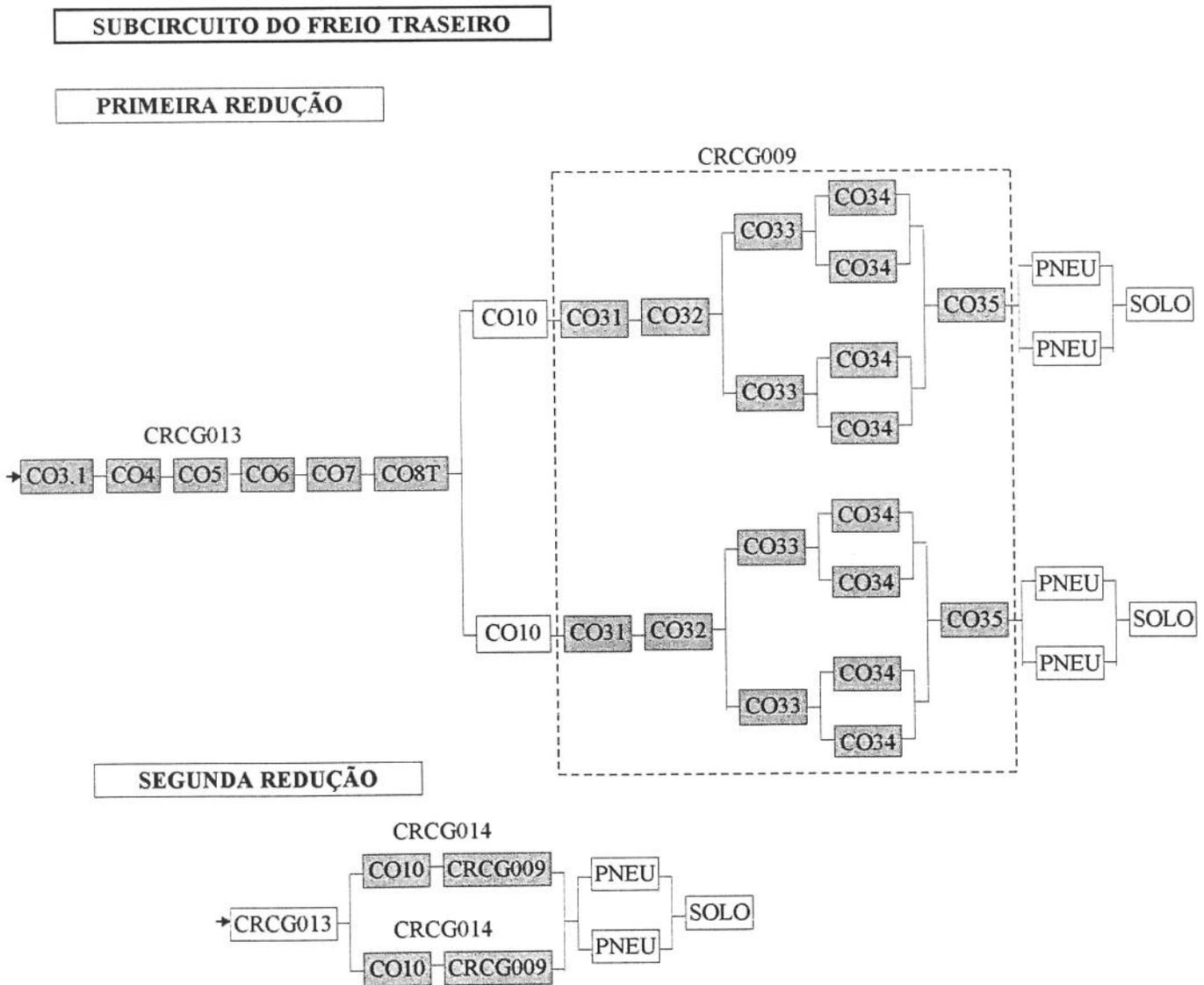


Figura 8. 6 Seqüência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito traseiro

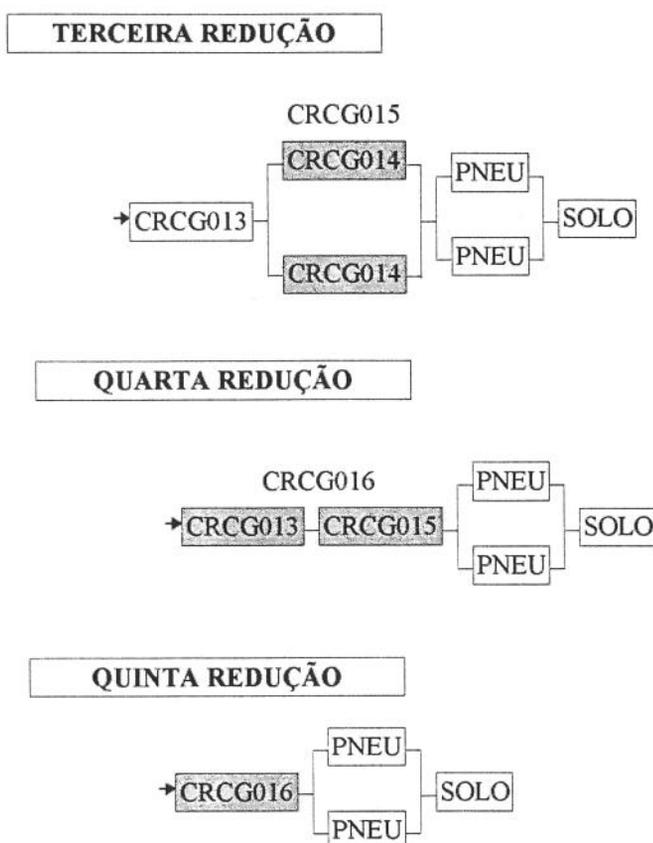


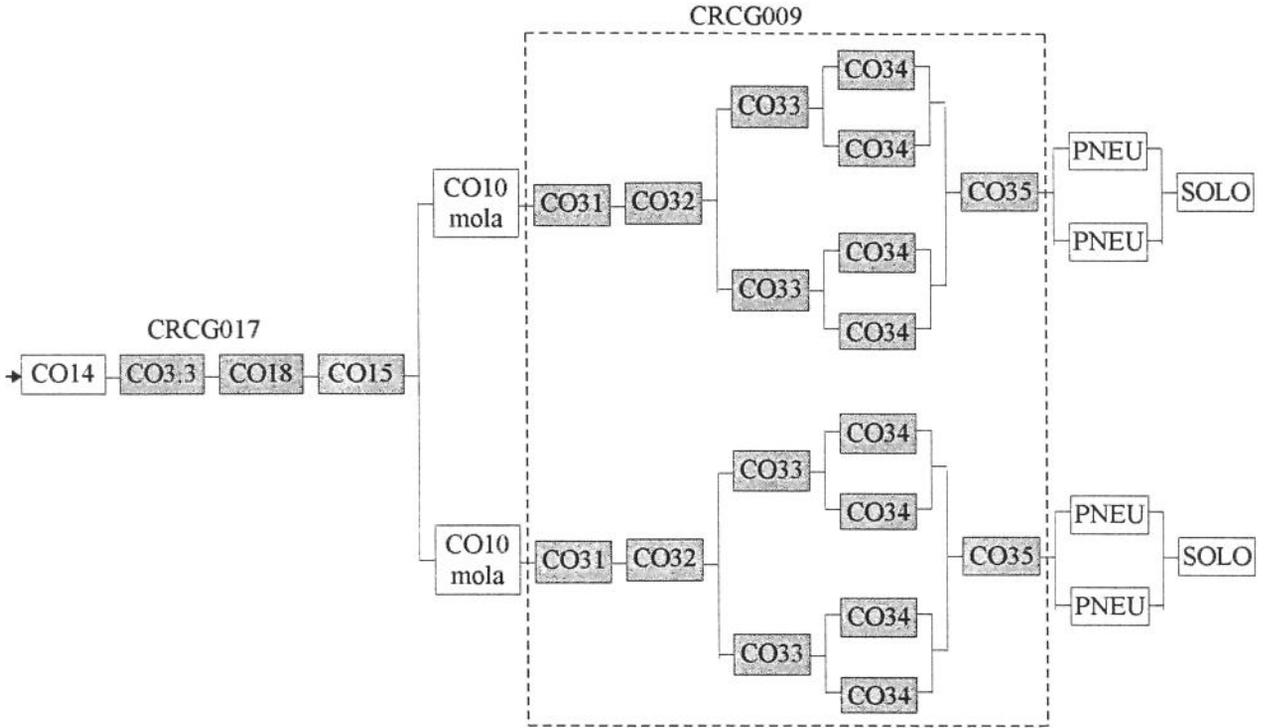
Figura 8.6: (Continuação) Seqüência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito traseiro.

O componente reduzido (CRCG016) é o componente síntese do subcircuito do freio de serviço do eixo traseiro.

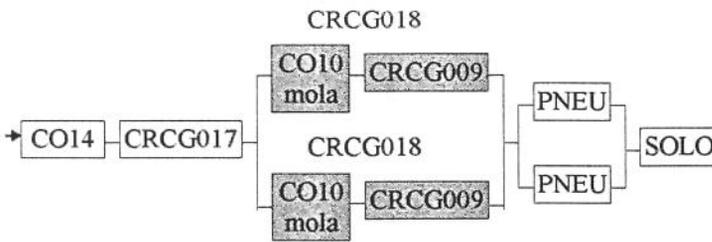
8.4.1.3 Composição dos componentes do subcircuito do freio de emergência/estacionamento

SUBCIRCUITO DO FREIO DE EMERGÊNCIA E ESTACIONAMENTO

PRIMEIRA REDUÇÃO



SEGUNDA REDUÇÃO



TERCEIRA REDUÇÃO

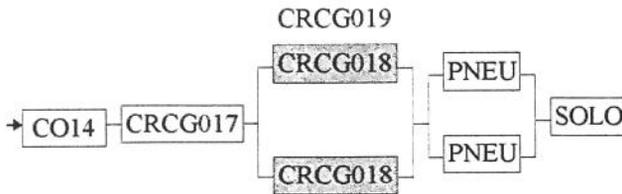


Figura 8. 7 Sequência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito de estacionamento e emergência

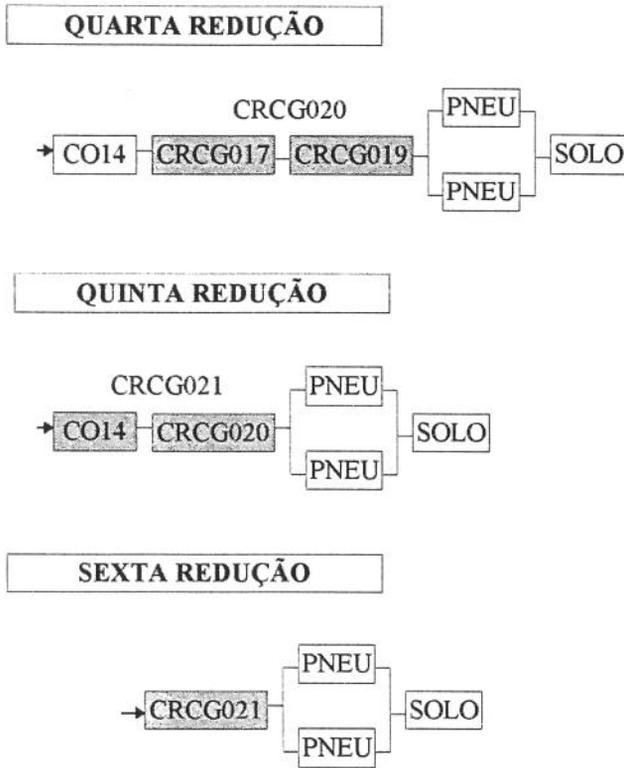


Figura 8.7: (Continuação) Seqüência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito de estacionamento e emergência.

O componente reduzido (CRCG021) é o componente síntese do subcircuito do freio de estacionamento e emergência.

8.4.1.4 Composição dos componentes do subcircuito de freio motor e auxiliares

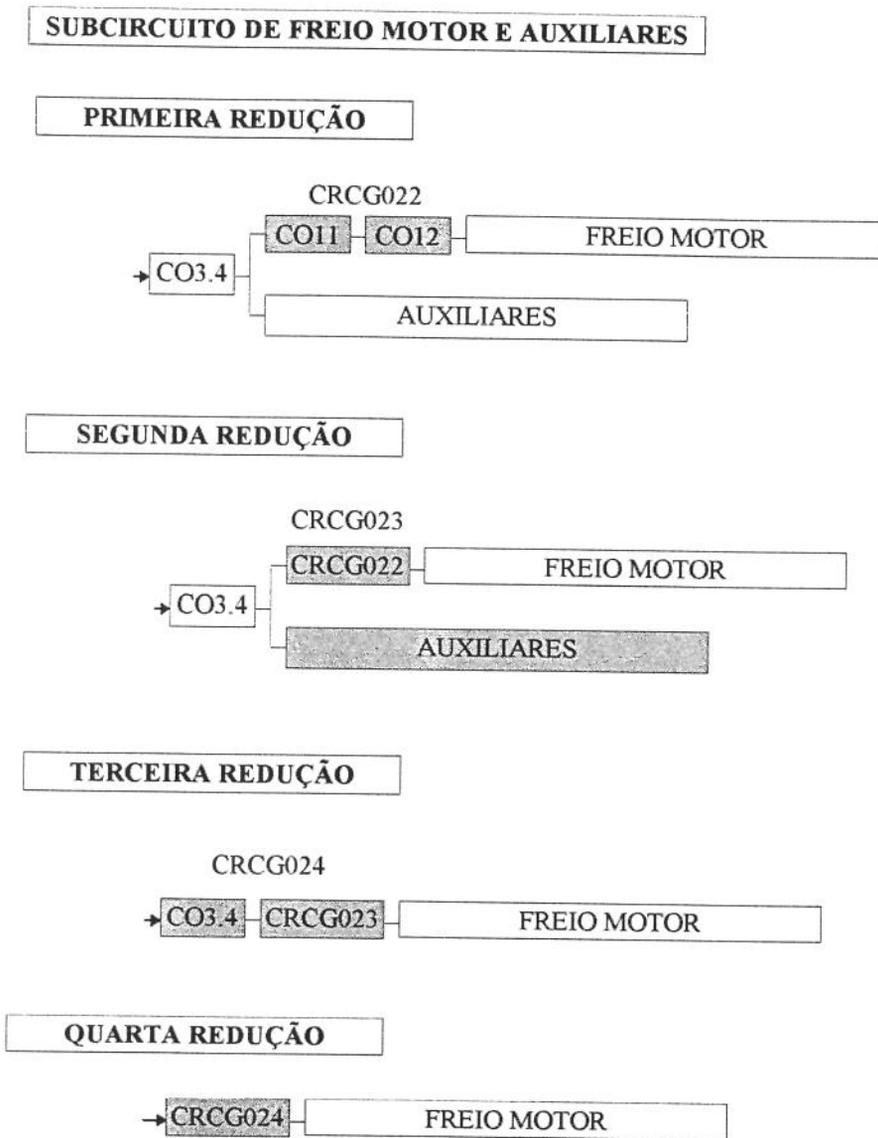


Figura 8. 8 Seqüência de composições para gerar o componente reduzido do subcircuito do freio motor

O componente reduzido (CRCG024) é o componente síntese do subcircuito do freio motor.

8.4.1.5 Síntese do modelo confiabilístico para o circuito principal

Essa é a última fase da análise do modelo confiabilístico. Será feita a síntese final da análise confiabilística, de forma a reduzir todo o circuito de freio pneumático num único componente.

A análise será feita para três casos:

- análise 1 - o freio de emergência e o freio motor (CRCG026) formam uma redundância ativa do freio de serviço(CRCG025);
- análise 2 - o freio de emergência e o freio motor têm a mesma confiabilidade do freio de serviço (CRCG026 = CRCG025) e formam uma redundância passiva do freio de serviço tendo o motorista na condição de comutador perfeito;
- análise 3 - repete-se a condição da análise 2 e tem-se a válvula de freio de mão (CO14) na condição de comutador real.

A partir dos componentes reduzidos de cada subcircuito será sintetizado o circuito geral de freio, como é mostrado na Figura 8. 9.

8.4.1.5.1 ANÁLISE 1: O freio de emergência e o freio motor formam uma redundância ativa do freio de serviço.

Nessa condição, a comutação do freio de emergência e do freio motor, para substituir o freio de serviço, ocorre automaticamente. Para isso, supõe-se também que os freios de emergência e motor produzam o mesmo efeito de frenagem que o freio de serviço. Deve-se observar que o freio motor não é projetado com esse fim e o freio de emergência só atua, automaticamente, em caso de perda total de pressão de ar no circuito. Está levantando-se essa hipótese de redundância ativa porque o veículo pode dispor de outros freios auxiliares que funcionem como redundantes. Admite-se que os itens tenham confiabilidades quaisquer, resultantes da composição dos componentes que formam cada circuito.

Para essa análise os freios de serviço do eixo dianteiro e traseiro são arranjados em série e reduzidos para o componente CRCG025. Da mesma forma o freio de emergência e o freio motor são reduzidos em série para formarem o componente CRCG026, Figura 8. 9.

ANÁLISE 1: SÍNTESE DO MODELO CONFIABILÍSTICO DO CIRCUITO PRINCIPAL

PRIMEIRA REDUÇÃO

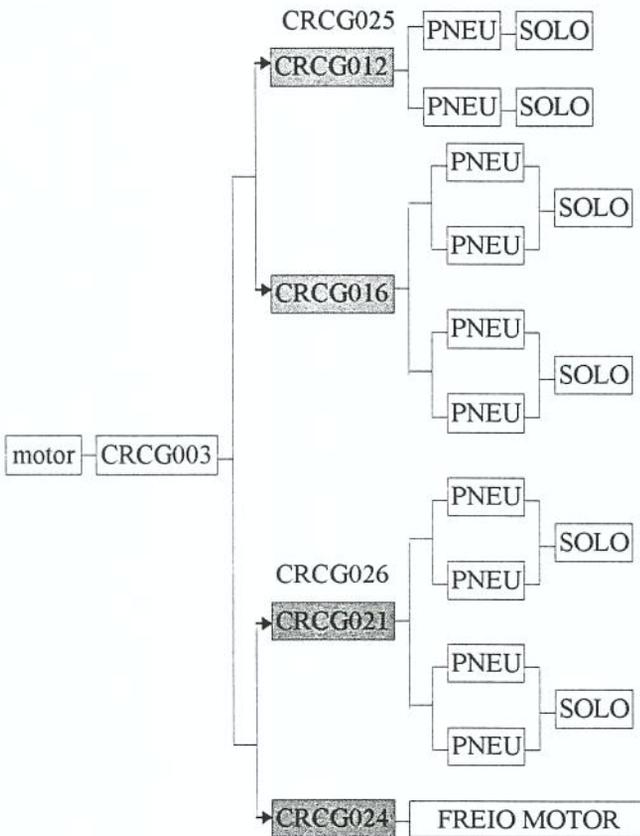


Figura 8. 9 Modelo confiabilístico considerando os componentes reduzidos de cada subcircuito

Os componentes reduzidos CRCG012 e CRCG016 são, respectivamente, os subcircuitos dianteiro e traseiro. São arranjados em série para compor o CRCG025, que é o componente síntese do freio de serviço do circuito da Figura 8. 1 e Figura 8.2. O componente reduzido CRCG021 é o freio de emergência e o CRCG024, o freio motor. Admite-se que os dois possam ser acionados simultaneamente e, nesse caso, são tratados como reservas do freio de serviço.

A composição da redundância ativa do freio de emergência e motor, sintetizadas no CRCG026, em relação ao freio de serviço CRCG025, é feita considerando o arranjo paralelo ativo, sendo $k = 1$ e $N = 2$. Esse arranjo gera o componente reduzido CRCG027.

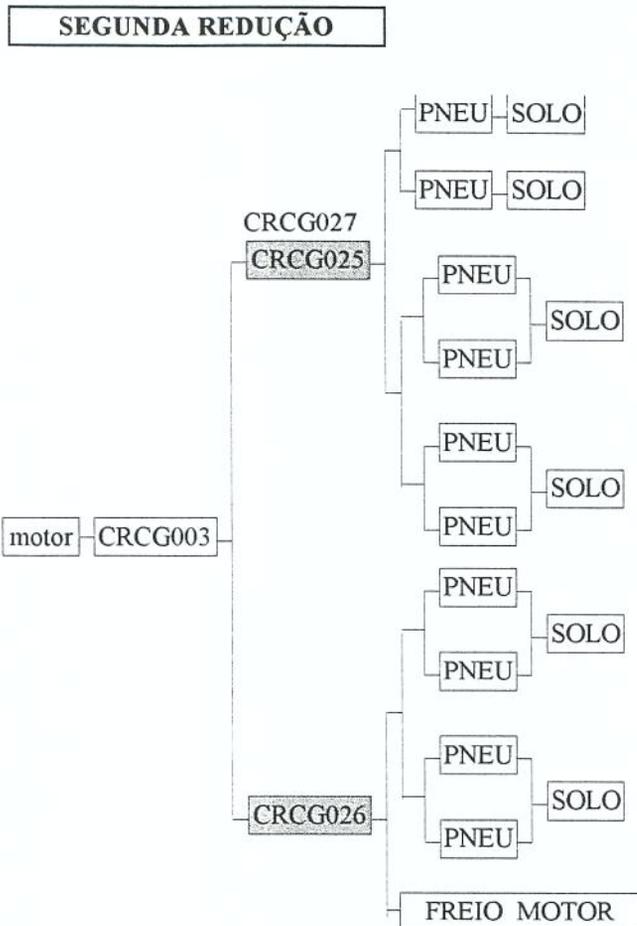


Figura 8.9: (Continuação) Modelo confiabilístico considerando os componentes reduzidos de cada subcircuito.

Finalmente, obteve-se a síntese final do circuito de freio pneumático, representado pelo componente reduzido (CRCG028) da Figura 8. 10. Esse desenvolvimento será analisado no programa computacional BRAKEREL. Serão obtidos os valores da confiabilidade, não-confiabilidade, taxa instantânea de falha e função densidade de probabilidade de falha, no formato de tabelas e na forma de gráficos, para cada componente simples ou composto nos componentes reduzidos.

Ressalva-se, contudo, que pelas informações dos catálogos de fabricantes e de normas técnicas, não é possível admitir o componente reduzido CRCG026 funcionando como redundante ativo do freio de serviço.

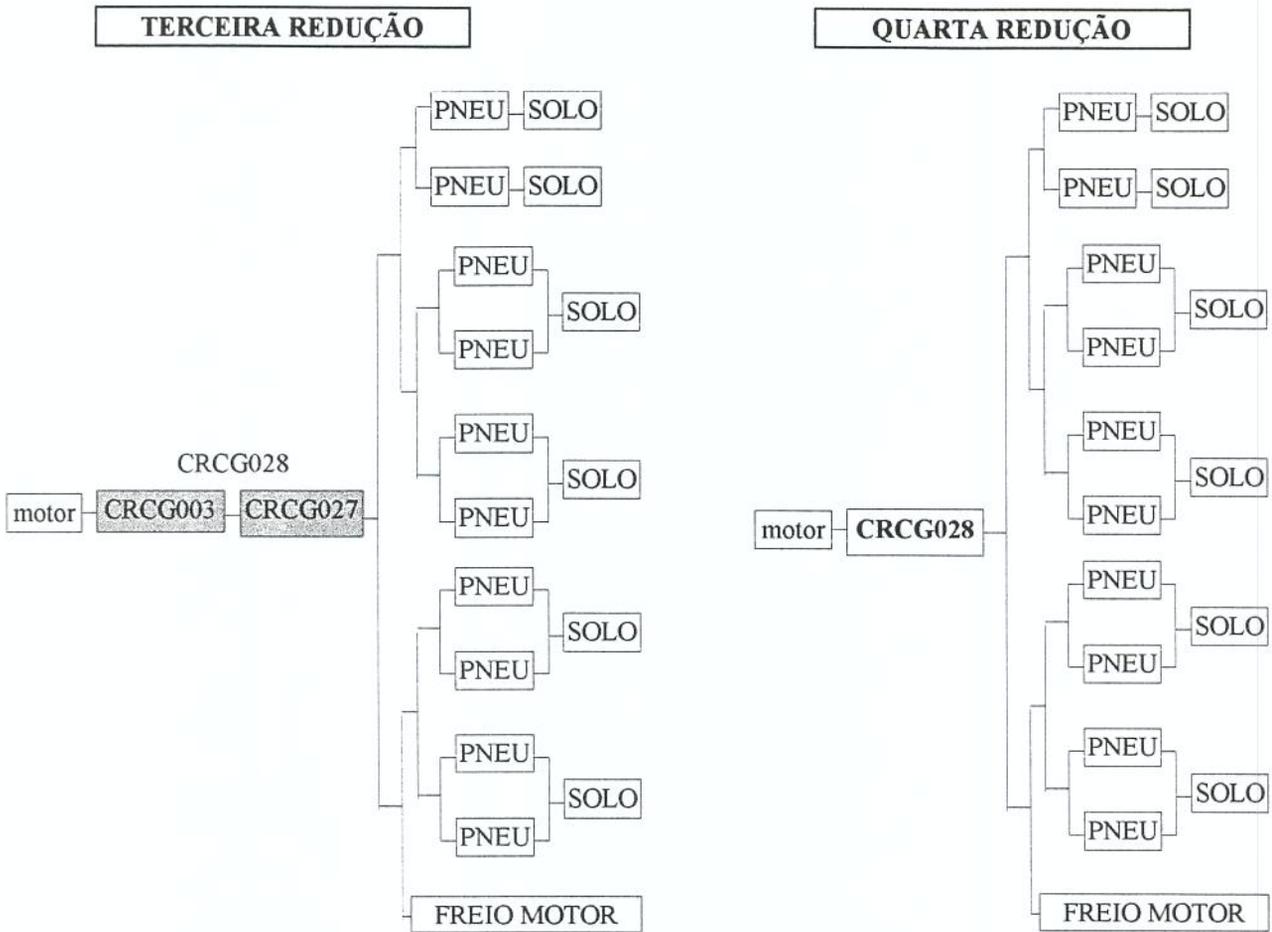


Figura 8. 10 Síntese final do modelo confiabilístico para o circuito de freio pneumático considerando o freio de emergência na reserva ativa

8.4.1.5.2 ANÁLISE 2: O freio de emergência e o freio motor têm a mesma confiabilidade do freio de serviço (CRCG026 = CRCG025) e formam uma redundância passiva do freio de serviço, tendo o motorista na condição de comutador perfeito;

O motorista faz a comutação dos freios de emergência e do freio motor, caso haja falha do circuito de freio de serviço. Para isso também se presume que os freios de emergência e o freio motor (CRCG026) produzam o mesmo efeito de frenagem que o freio de serviço. Considera-se ainda que a confiabilidade do componente reduzido CRCG026 seja a mesma do freio de serviço (CRCG025). Essa é uma situação hipotética, que não corresponde à realidade. Normalmente a atuação desses freios não se dá de forma conjunta, nem a frenagem executada através deles equivale à frenagem exercida pelo freio de serviço.

A outra hipótese foi considerar o motorista como comutador perfeito. É difícil determinar a confiabilidade humana. Park[76] apresenta vários aspectos da metodologia que trata dessa questão.

A Figura 8. 11 representa o modelo confiabilístico do circuito geral de freio, para fazer a análise 2. São aproveitados os diagramas funcionais utilizados na análise 1. O componente reduzido CRCG029 é resultante do arranjo paralelo com redundância passiva, sendo que o item CRCG025 está em operação, o item CRCG026 está na reserva e o comutador perfeito é o motorista.

ANÁLISE 2: SÍNTESE DO MODELO CONFIABILÍSTICO DO CIRCUITO PRINCIPAL

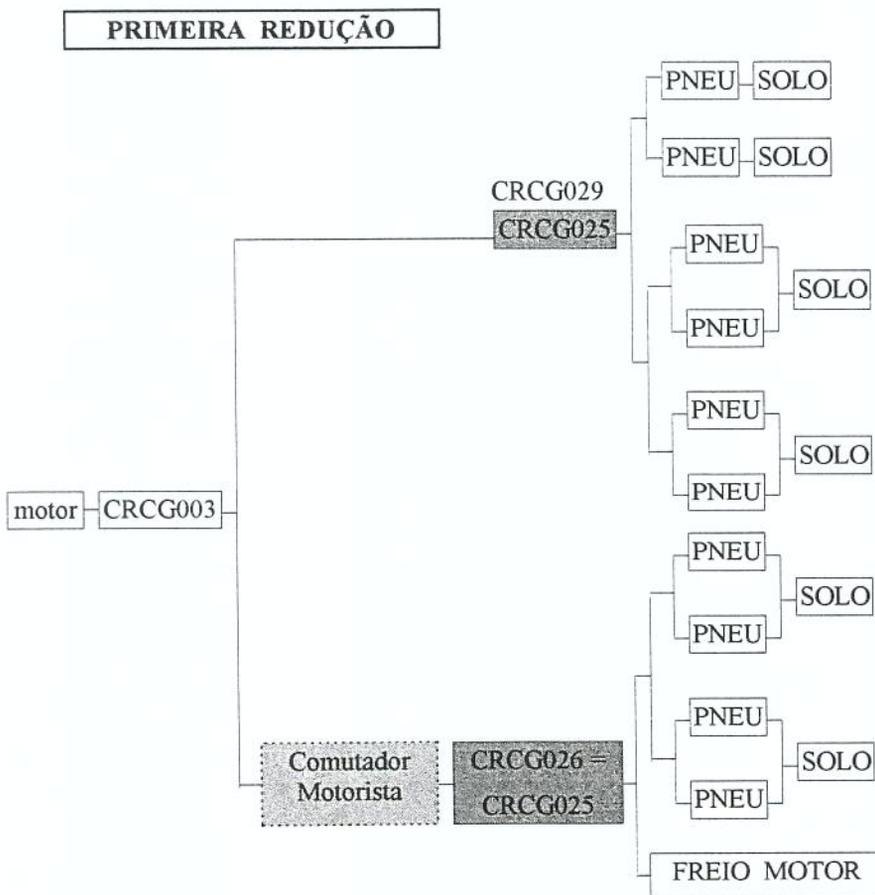


Figura 8. 11 Modelo confiabilístico para a análise 2

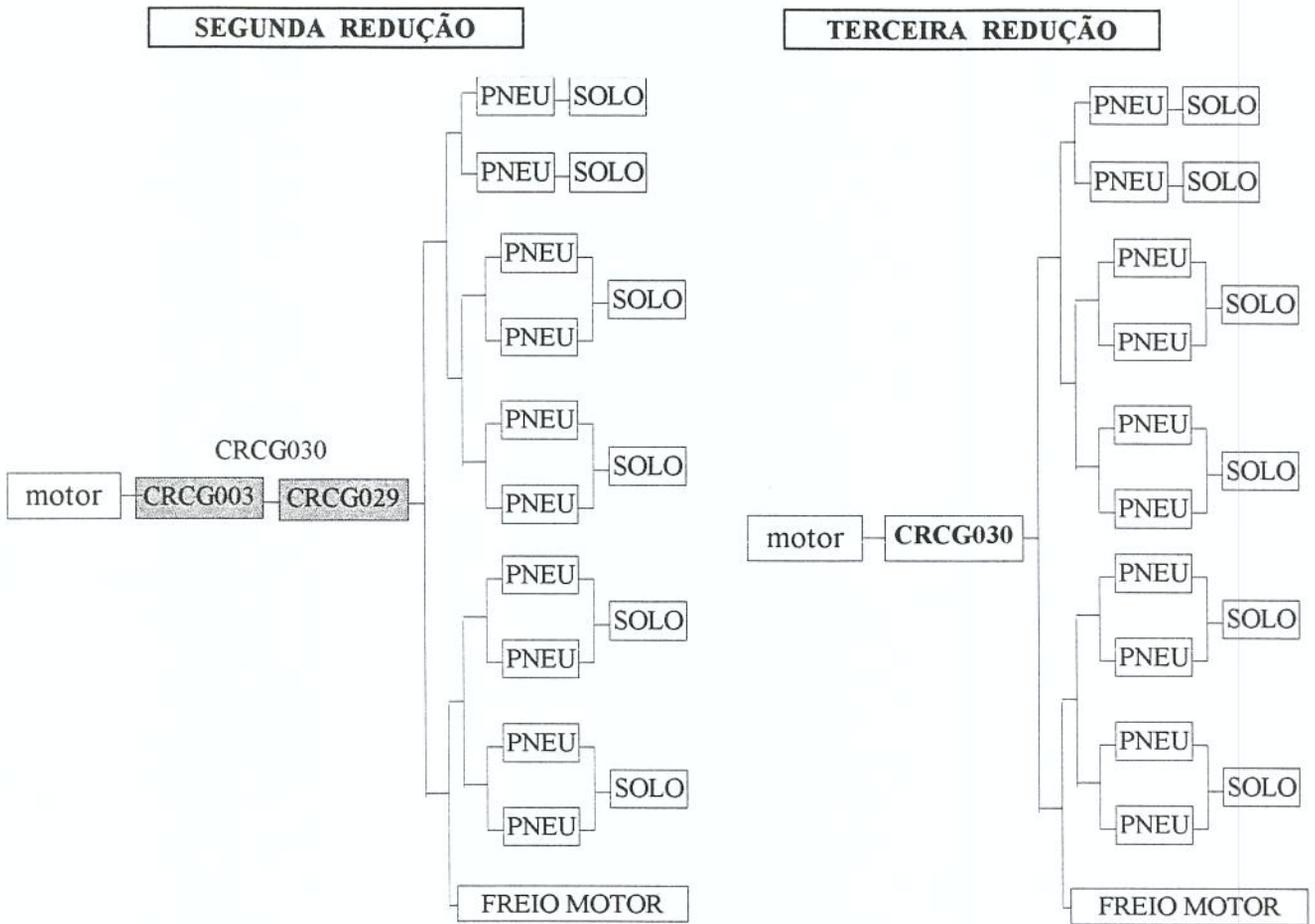


Figura 8. 12 Síntese final do modelo confiabilístico para o circuito de freio pneumático considerando o freio de emergência na reserva ativa

8.4.1.5.3 ANÁLISE 3: repete-se a condição da análise 2 e tem-se a válvula de freio de mão (CO14) na condição de comutador real

Esse caso é semelhante ao anterior trocando-se, porém, o comutador perfeito por um comutador real. O componente reduzido CRCG031 é resultante do arranjo paralelo com redundância passiva, sendo que o item CRCG025 está em operação (item ativo), o item CRCG026 está na reserva (item ativo), e o comutador real é a válvula do freio de mão CO14.

ANÁLISE 3: SÍNTESE DO MODELO CONFIABILÍSTICO DO CIRCUITO PRINCIPAL

PRIMEIRA REDUÇÃO

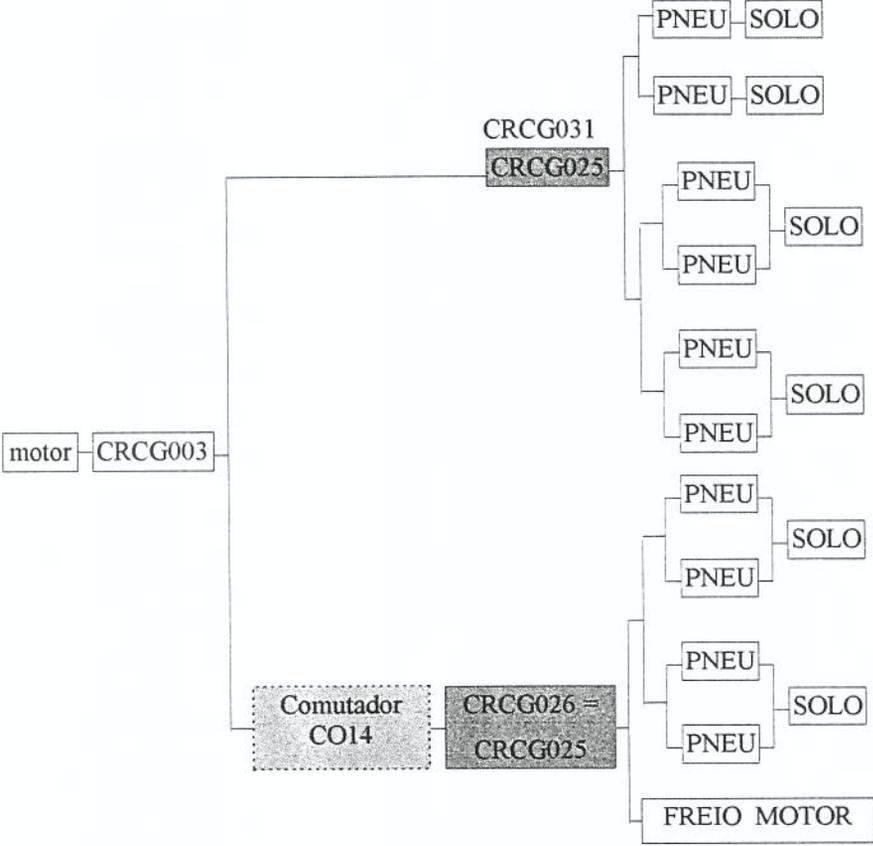


Figura 8. 13 Modelo confiabilístico para a análise 3

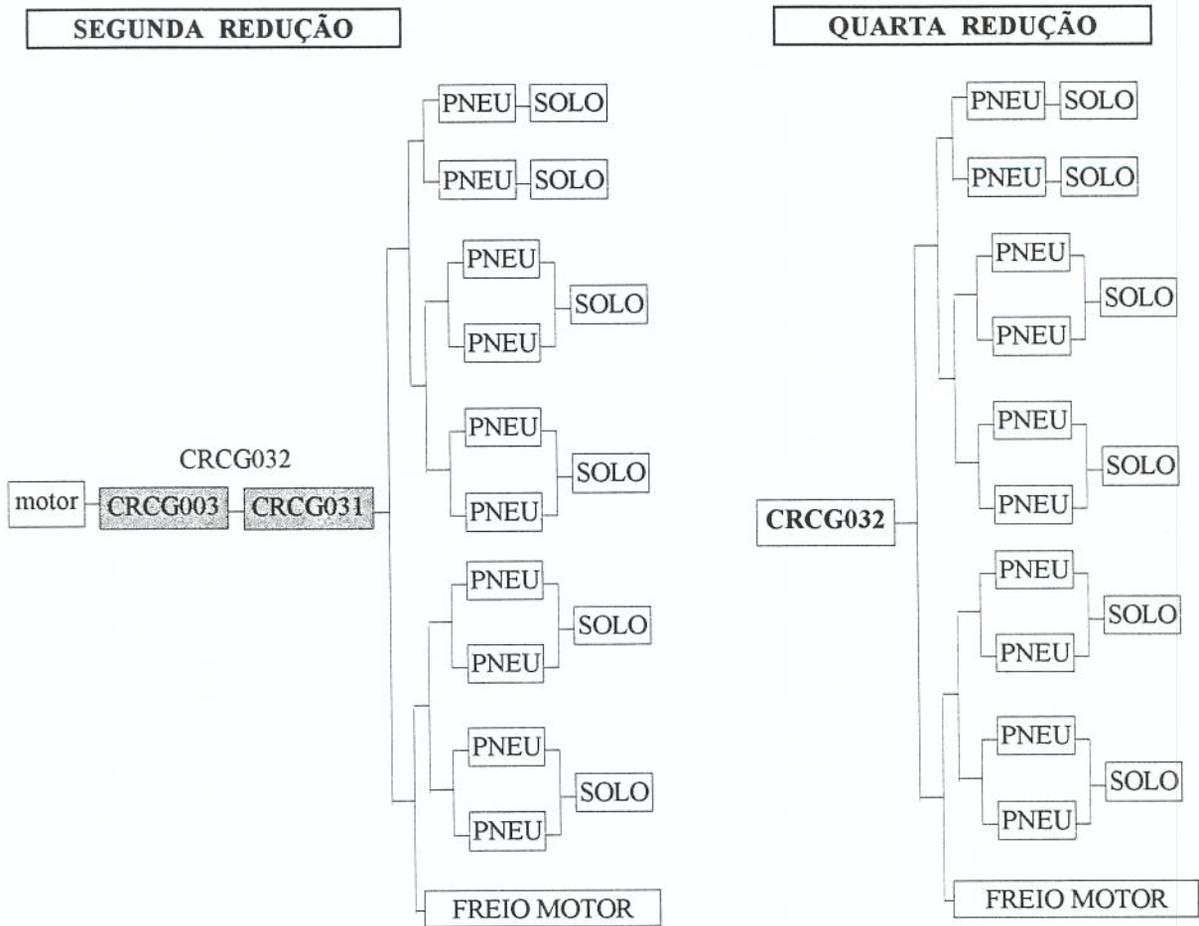


Figura 8. 14 Síntese final do modelo confiabilístico para o circuito de freio pneumático considerando o freio de emergência e motor na reserva passiva e a válvula de freio de mão como comutador

8.4.2 Modelo confiabilístico para os subsistemas de “atuação”.

De acordo com a metodologia, além da análise global é importante fazer avaliações por subcircuitos ou subsistemas de atuação. Como proposto no capítulo 6, o circuito de freio foi dividido em 5 subsistemas de “atuação”. A construção do modelo confiabilístico para cada subsistema de “atuação” levará em consideração a análise feita sobre o modelo físico, as variáveis relativas a cada componente e o próprio modelo confiabilístico do circuito geral.

A divisão dos itens de um sistema geral em subsistemas de “atuação” não é tarefa simples. Muitos itens têm atuação múltipla. Outros, mesmo sendo impulsionados por uma determinada forma de energia, executam funções vinculadas a outros subsistemas de atuação.

As divisões aqui foram feitas de forma intuitiva. Seguiu-se as orientações de catálogos de fabricantes, de normas, relatos técnicos e a localização do item dentro do circuito pneumático. Ressente-se porém de discussões mais amplas sobre as especificidade de cada item dentro do circuito, como também de uma nomenclatura mais adequada para representar as divisões em subsistemas.

Para os subsistemas de atuação o componente reduzido será chamado de CRSP (Componente Reduzido do Subsistema Pneumático), ou CRSM para o subsistema mecânico, e assim por diante. Evidentemente, dentro do mesmo subsistema, será acrescentado ao código um número de ordem. Essa codificação deve ser compatível com a codificação estabelecida para montar os arranjos no programa BRAKEREL.

Na Tabela 8. 3 estão os itens que constituem o subsistema de “atuação” pneumática.

8.4.2.1 Subsistema de “atuação” Pneumática (SP)

É o subsistema construído de itens que são responsáveis pela geração, direcionamento e aplicação da energia pneumática. Observa-se que o componente da câmara do freio de emergência/estacionamento, embora seja acionado por mola helicoidal (CO10 mola), está incluído nesse subcircuito, visto que a mola depende da atuação pneumática.

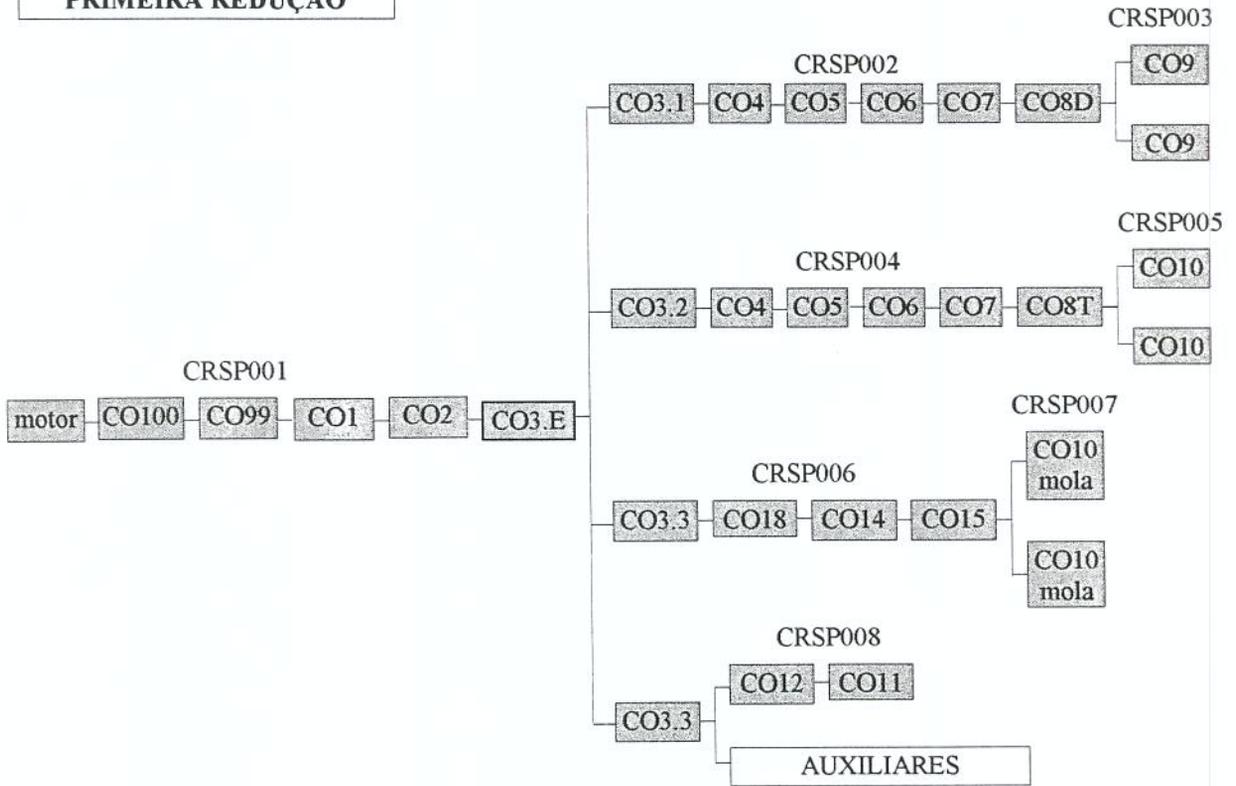
Tabela 8. 3 Relação dos componentes que são utilizados para constituir o subsistema de “atuação” pneumática da Figura 8. 1. (* As taxas de falha e parâmetros de forma foram adotadas aleatoriamente)

BRAKEREL - Brake Reliability Program				
Componentes do subsistema de “atuação” pneumática				
Nº	Código de identificação	Nome do componente	Taxa de falha x 10⁻⁶/km *	Parâmetro de forma *
1	CO1	Compressor	2,0	1,5
2	CO2	Regulador de pressão	2,0	2,0
3	CO3 E	Entrada da Válv. de 4 circuitos	1,0	2,0
4	CO3.1	Válv. de 4 circuitos - saída circ. traseiro	1,0	2,0
5	CO3.2	Válv. de 4 circuitos- saída circ dianteiro	1,0	2,0
6	CO3.3	Válv. de 4 circuitos- saída circ. estac.	1,0	2,0
7	CO3.4	Válv. de 4 circuitos- saída circ. auxil.	1,0	2,0

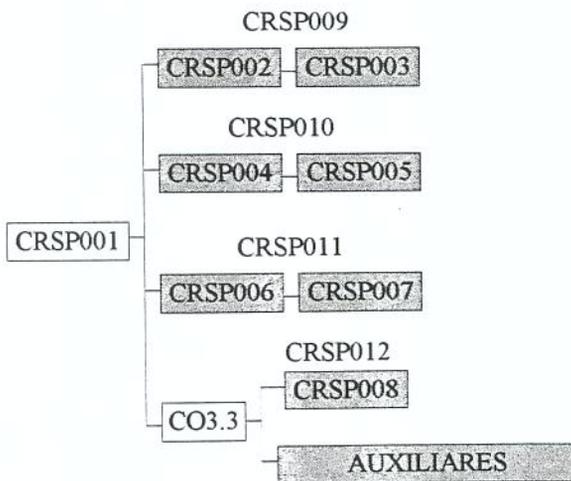
BRAKEREL - Brake Reliability Program				
Componentes do subsistema de "atuação" pneumática				
N_o	Código de identificação	Nome do componente	Taxa de falha x 10⁻⁶/km³	Parâmetro de forma³
8	CO4	Tomada de teste	1,0	2,0
9	CO5	Reservatório	1,0	3,5
10	CO6	Válvula de dreno manual	1,0	2,5
11	CO7	Manômetro	1,0	2,0
12	CO8D	Válvula pedal circuito do eixo dianteiro	1,5	1,7
13	CO8T	Válvula pedal circuito do eixo traseiro	1,5	1,7
14	CO9	Cilindro membrana	2,0	1,5
15	CO10	Cilindro "tristop" câmara pneumática	2,0	1,5
16	CO10 mola	Cilindro "tristop" câmara de mola	2,0	1,5
17	CO11	Válvula solenóide	1,0	2,0
18	CO12	Cilindro freio motor	1,0	1,8
19	CO13	dispositivos auxiliares	1,0	2,0
20	CO14	Válvula do freio de mão	1,0	1,8
21	CO15	Válvula relé	1,0	1,8
22	CO18	Válvula de retenção	0,8	2,5
23	CO99	Tubos e conexões	1,0	2,0
24	CO100	Conexão motor-compressor	1,0	2,0
25	COauxiliares	dispositivos pneumáticos diversos	1,0	2,0

MODELO CONFIABILÍSTICO DO SUBCIRCUITO DE ATUAÇÃO PNEUMÁTICA

PRIMEIRA REDUÇÃO



SEGUNDA REDUÇÃO



TERCEIRA REDUÇÃO

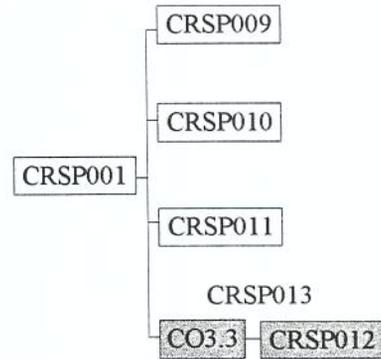


Figura 8. 15 Síntese do modelo confiabilístico para o subsistema de “atuação” pneumática

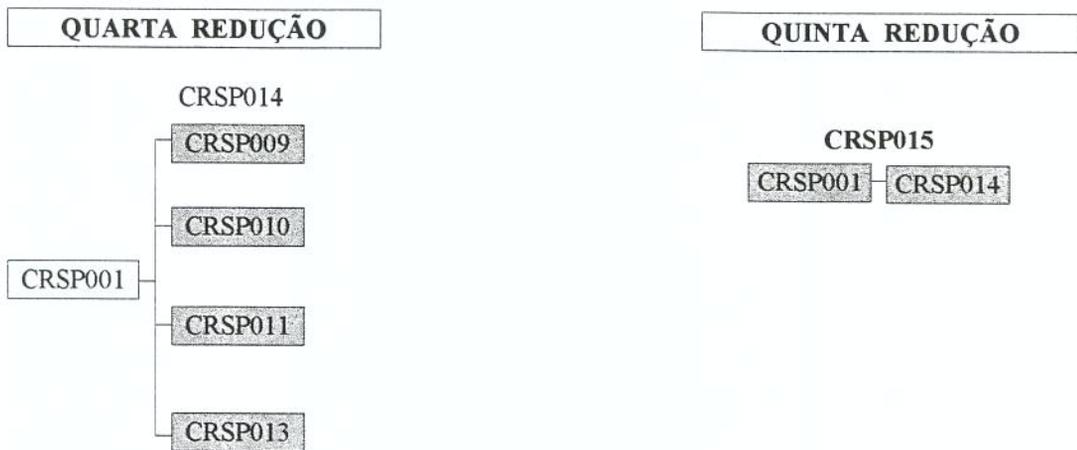


Figura 8.15 (Continuação) Síntese do modelo confiabilístico para o subsistema de “atuação” pneumática

O item CRSP015 (componente reduzido subsistema pneumático) sintetiza todo os componentes pneumáticos existentes num circuito de freio pneumático equivalente ao que está mostrado na Figura 8. 1.

8.4.2.2 Subsistema de “atuação” Mecânica (SM)

Esse subsistema é constituído dos componentes do freio de tambor (Figura 8. 2), relacionados na tabela abaixo. Esse subsistema é basicamente o mesmo, tanto para o freio do eixo dianteiro quanto para os eixos traseiros de caminhões e ônibus, reboques e semi-reboques. Normalmente eles possuem dimensões diferentes. Considerou-se, contudo, que os itens, independentemente das dimensões, são projetados para o mesmo referencial de confiabilidade, ou seja, têm as mesmas taxas de falhas e os mesmos parâmetros de forma.

Tabela 8. 4 Relação dos componentes que são utilizados para constituir os subsistema de atuação mecânica Figura 8. 2. (* As taxas de falha e parâmetros de forma foram adotadas aleatoriamente)

BRAKEREL - Brake Reliability Program				
Componentes do subsistema de “atuação” mecânica				
No	Código de identificação	Nome do componente	Taxa de falha x 10⁻⁶/km *	Parâmetro de forma *
1	CO31	Alavanca de ajuste do freio	0,8	2,5
2	CO32	Eixo expensor das sapatas	0,5	3,0
3	CO33	Sapata de freio	0,5	2,5
4	CO34	Guarnição de freio	2,5	1,8
5	CO35	Cubo de roda	1,0	2,0

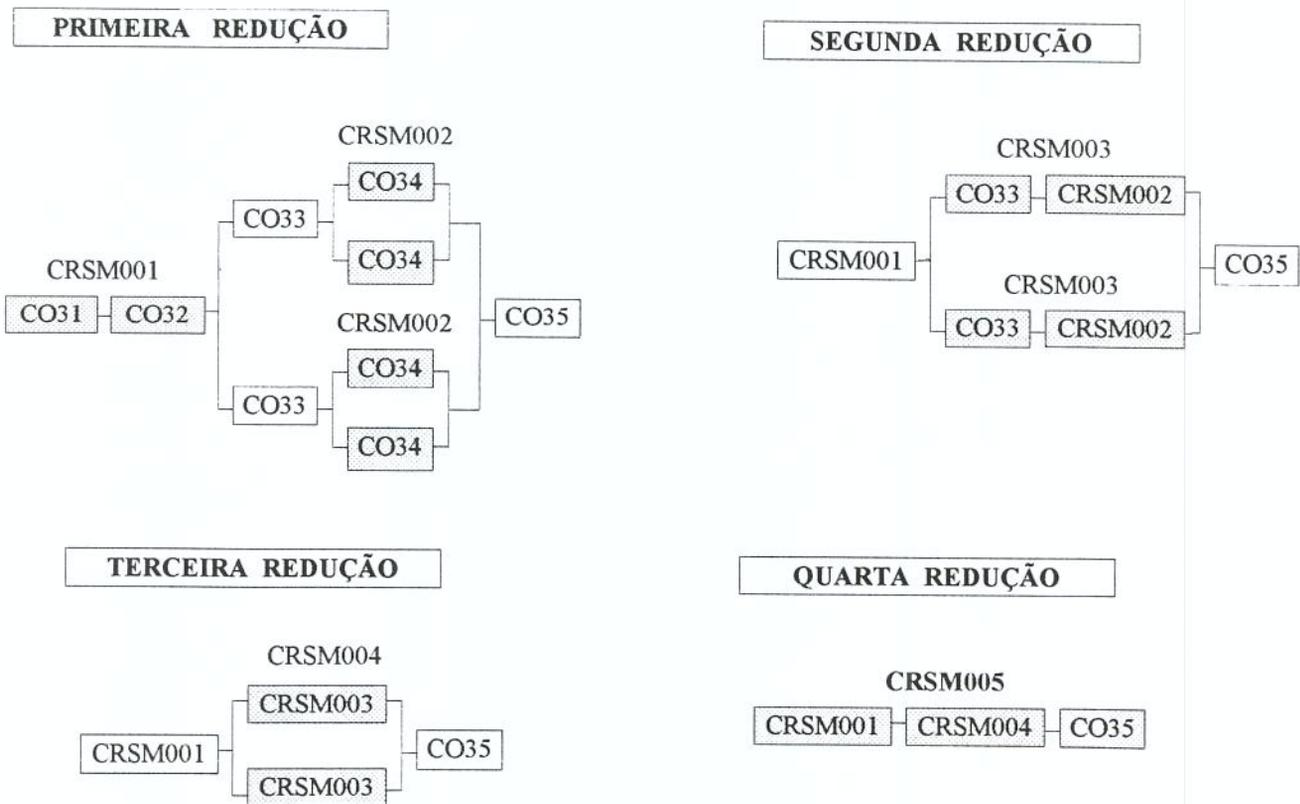


Figura 8. 16 Síntese do modelo confiabilístico para o subsistema de “atuação” mecânica

O item CRSM (componente reduzido subsistema mecânico) sintetiza todo os componentes que constituem o freio de sapatas como, mostrado na Figura 8. 2.

8.4.2.3 Sistema de “atuação” Elétrica (SE)

O componente de “atuação” elétrica que atua no circuito pneumático da Figura 8. 1 é somente a válvula solenóide. A válvula relé, em muitos circuitos, também tem atuação elétrica. Às vezes ela pode atuar elétrica ou pneumaticamente. Para fins de exemplificação será considerado que, nesse caso, a válvula relé também tem atuação elétrica.

Existem, em qualquer circuito, outros dispositivos que estão vinculados ao freio e que têm atuação elétrica. São os itens que participam do grupo de controle e alerta. Por exemplo, as sinaleiras colocadas na carroceria do veículo, ou sinalizadores sonoros ou luminosos colocados nas cabines para alertar o motorista da queda de pressão pneumática no circuito. Esses não estão diretamente ligados à função de frenagem. Por isso não são considerados no subsistema de atuação pneumática.

Tabela 8. 5 Relação dos componentes que são utilizados para constituir o subsistema de atuação elétrica. (* As taxas de falha e parâmetros de forma foram adotadas aleatoriamente)

BRAKEREL - Brake Reliability Program				
Componentes do subsistema de “atuação” elétrica				
Nº	Código de identificação	Nome do componente	Taxa de falha x 10 ⁻⁶ /km *	Parâmetro de forma *
1	CO11	Válvula solenóide	1,0	2,0
2	CO15	Válvula relé	1,0	1,8

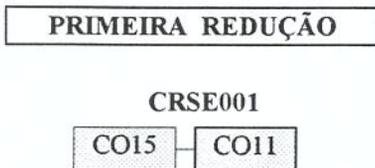


Figura 8. 17 Síntese do modelo confiabilístico para o subsistema de “atuação” elétrica.

8.4.2.4 Sistema de “atuação” eletrônica (ST)

Esse circuito não contém componentes eletrônicos.

A tendência atual é aumentar a utilização de itens eletrônicos dentro dos circuitos de freios pneumáticos. Os veículos da geração de 1996, que seguem as normas da ECE [33], já possuem uma série de dispositivos eletrônicos, atuando, principalmente, como sensores.

8.4.2.5 Sistema de “atuação” Hidráulica (SH)

Esse estudo de caso está sendo feito para o circuito pneumático puro. Há veículos com circuito pneumático puro que possuem freio auxiliar (“*retarder*”) hidrodinâmico. Esses dispositivos poderiam se encaixar nesse subsistema de atuação.

8.4.3 Modelo confiabilístico para grupos de função

A análise do circuito por grupo de função objetiva analisar a confiabilidade do circuito de freio através desses grupos. Os grupos foram definidos considerando o tipo de função que um determinado conjunto de itens desempenhava: gerar energia, acumular, direcionar, aplicar e assim diante. Esse tipo de enfoque admite grande flexibilidade de análise e facilita o estudo comparativo da confiabilidade entre os grupos. A partir dela o analista pode, por exemplo, separar o grupo que está diretamente ligado à segurança veicular daquele que, ao falhar, tem repercussão pouco significativa na segurança do veículo. Além disso é possível associar sensores aos grupos cujas falhas ocorrem parametricamente. Aos que têm mais propensão a falhas catastróficas, pode-se concentrar esforços no sentido de evitar que a falha interfira no circuito como um todo. Em último caso pode-se dotá-los de redundâncias ou, então, melhorá-los tecnicamente, agregando tecnologia.

Para os grupos de função, o código será formado pelo CR (Componente Reduzido) e pelas letras iniciais dos grupos a que pertence. Evidentemente, dentro do mesmo grupo será acrescentado ao código um número de ordem.

8.4.3.1 Grupo Conexão Motor-Compressor (GMC)

Esse grupo é formado somente pelo componente CO100, que faz conexão entre o motor e o compressor. Nesse caso, o CO100 é o próprio componente reduzido do grupo Motor compressor, codificado por CRGMC, mais o número de ordem. Essa conexão pode ser feita por:

- correia;
- engrenagens;
- acoplamentos.

Evidentemente, cada uma dessas conexões vai ter um padrão de confiabilidade distinto.

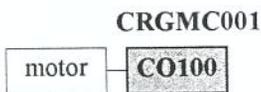


Figura 8. 18 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo de função motor-compressão.

8.4.3.2 Grupo Gerador de Energia (GGE)

O compressor (CO1), a válvula de controle de pressão (CO2) e a válvula de 4 vias (CO3) fazem parte do grupo gerador de energia. Há circuitos que são constituídos por vários outros itens. Muitas vezes até o reservatório úmido faz parte desse grupo.

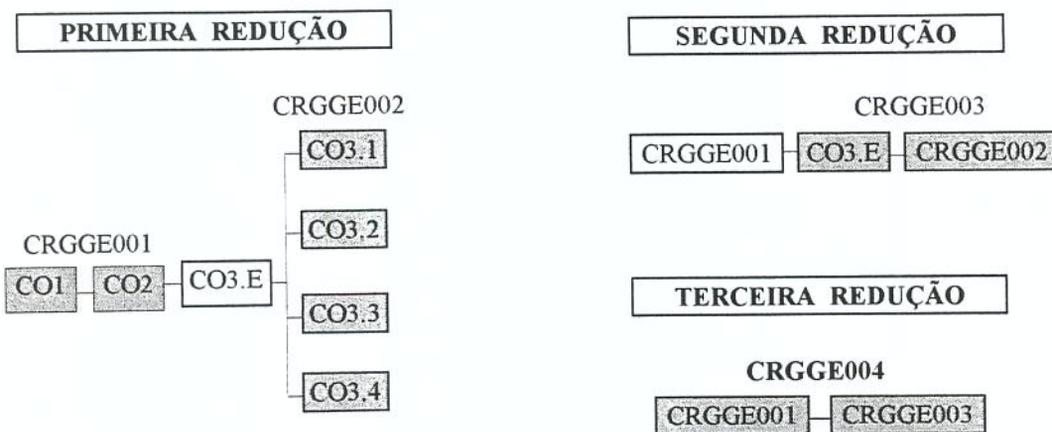


Figura 8. 19 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo gerador de energia.

O componente reduzido CRCGE001 representa o compressor e a válvula de controle de pressão (governador), e o componente CRCGE003, a válvula de 4 vias.

8.4.3.3 Grupo Acumulador de Energia (GAE)

É formado pelo reservatório de ar (CO5) e pela válvula de dreno manual. Em alguns circuitos essa válvula é automática.

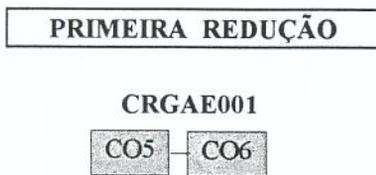


Figura 8. 20 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo acumulador de energia.

8.4.3.4 Grupo de Válvulas de Acionamento (GVA)

O grupo de válvulas de acionamento é responsável pela aplicação do sistema de frenagem. Desse ponto de vista é fundamental para a segurança da frenagem.

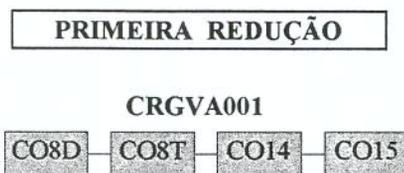


Figura 8. 21 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo de válvulas de acionamento.

8.4.3.5 Grupo de Controle e Alerta (GCA)

Esses itens não estão sendo considerados dentro do modelo confiabilístico, pois não fazem parte do sistema de frenagem.

8.4.3.6 Grupo de Freio Auxiliar (GFA)

Nesse caso específico o freio auxiliar é o freio motor. Em outros circuitos, porém, outros sistemas fazem parte do freio auxiliar.

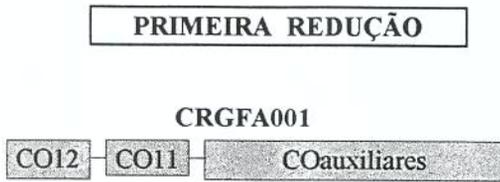


Figura 8. 22 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo freio motor.

8.4.3.7 Grupo de Eixo Dianteiro (GED)

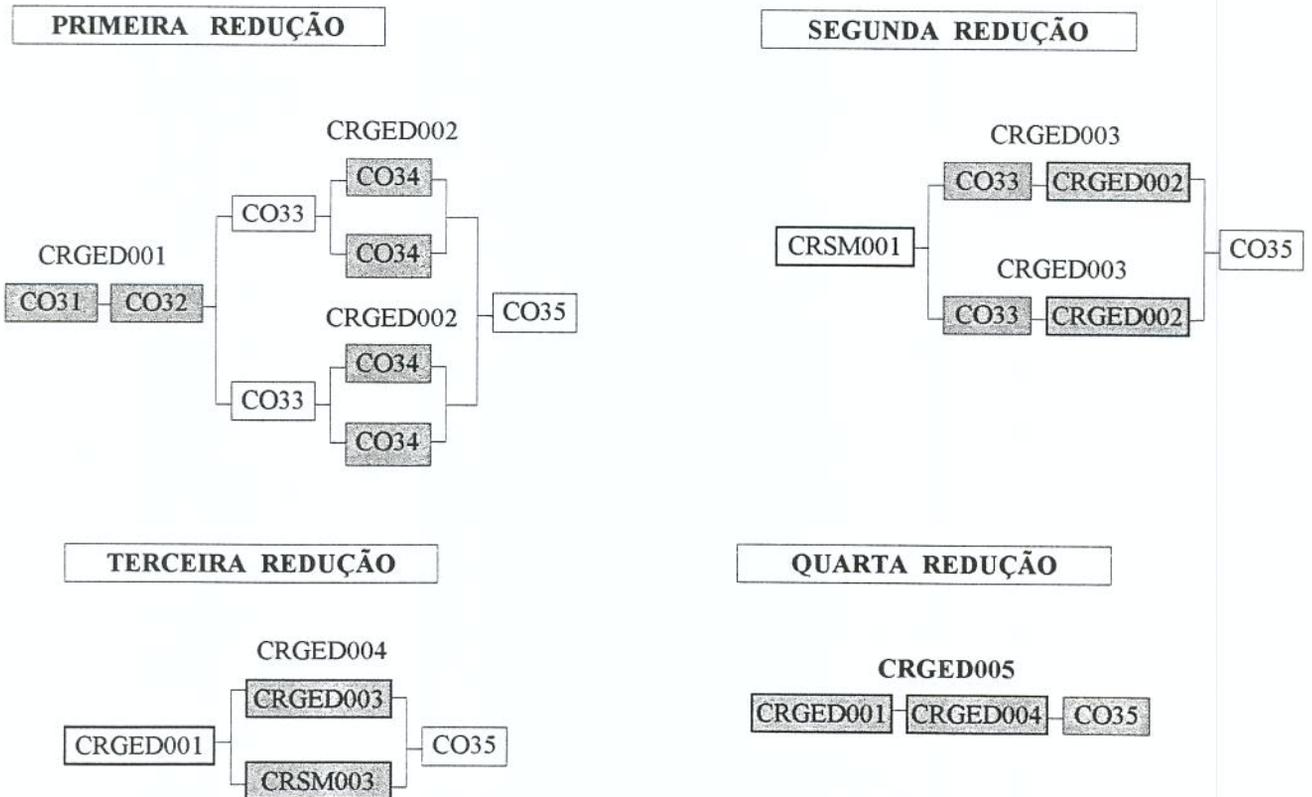


Figura 8. 23 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo freio dianteiro.

8.4.3.8 Grupo de Eixo Traseiro (GET)

O grupo do freio traseiro tem os mesmos itens do freio dianteiro, segundo o modelo montado. Os componentes reduzidos teriam, no entanto, o código correspondente ao eixo traseiro, CRGET, mais o número de ordem.

8.4.3.9 Grupo de eixo da Carreta (GEC)

Esse grupo não existe no circuito de freio das figuras Tabela 8. 1 e Tabela 8. 2. Tem os mesmos itens do grupo do eixo dianteiro. A figura 5.3 mostram o modelo físico do circuito de freio pneumático do cavalo mecânico, preparado para conectar o reboque ou semi-reboque. A figura 5.4 mostra o modelo físico do circuito de freio pneumático de um semi-reboque. O freio de sapatas é o mesmo da figura 8.2.

8.4.3.10 Relação Pneu-Solo (RPS)

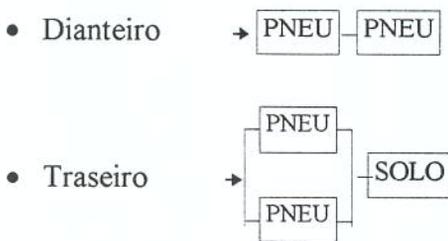


Figura 8. 24 Síntese do modelo confiabilístico para o grupo de relação pneu-solo

O grupo de função não será analisado. Embora tenha uma relação direta com a frenagem, não faz parte dessa análise de sistemas de freios pneumáticos. Em trabalhos que venham a considerar a confiabilidade da frenagem, deve-se dar atenção destacada à relação pneu-solo.

8.5 Obtenção das funções confiabilísticas do circuito de freio através do programa computacional BRAKEREL

Nesse subcapítulo serão feitos os cálculos para determinar todas as variáveis confiabilísticas dos itens, sendo os resultados expressos na forma de gráficos e de tabelas. Esses cálculos podem ser feitos para todos os itens que constituem o circuito de freio e estiverem cadastrados no banco de dados do BRAKEREL. Nesse trabalho, porém, serão calculadas todas as variáveis confiabilísticas para alguns componentes reduzidos sínteses, com o objetivo de:

- demonstrar que pode-se obter os resultados de cálculos na forma de gráficos e tabelas para os diversos componentes reduzidos para o circuito geral, para os subsistemas de atuação e para os grupos de função;
- utilizar os gráficos e tabelas tanto na escala de Weibull quanto na escala linear;
- fazer o cruzamento dos dados obtidos para os diferentes componentes reduzidos, com o objetivo de compará-lo segundo um mesmo referencial de análise;
- demonstrar que o modelo computacional concretizado no programa BRAKEREL está estruturado para processar e fornecer as informações que são necessárias e indispensáveis para a análise confiabilística de sistemas de freios pneumáticos automotivos.

8.5.1 Análise das funções confiabilísticas para o circuito principal (Figura 8.3)

Os resultados dos cálculos são para as composições feitas na montagem dos componentes reduzidos, inseridos no subcapítulo 8.4.1.

Como visto na figura 8.5, o componente reduzido CRCG012 sintetiza o circuito de freio do eixo dianteiro do veículo. Na Figura 8. 25 tem-se o gráfico da confiabilidade, na escala de Weibull. Vê-se que a confiabilidade do componente reduzido CRCG012, no início da vida, era de 99,99%; após percorrido 30.000 km, essa confiabilidade diminuiu para 90,00%. Tem-se ainda os valores da taxa de falha e do parâmetro de forma do componente reduzido.

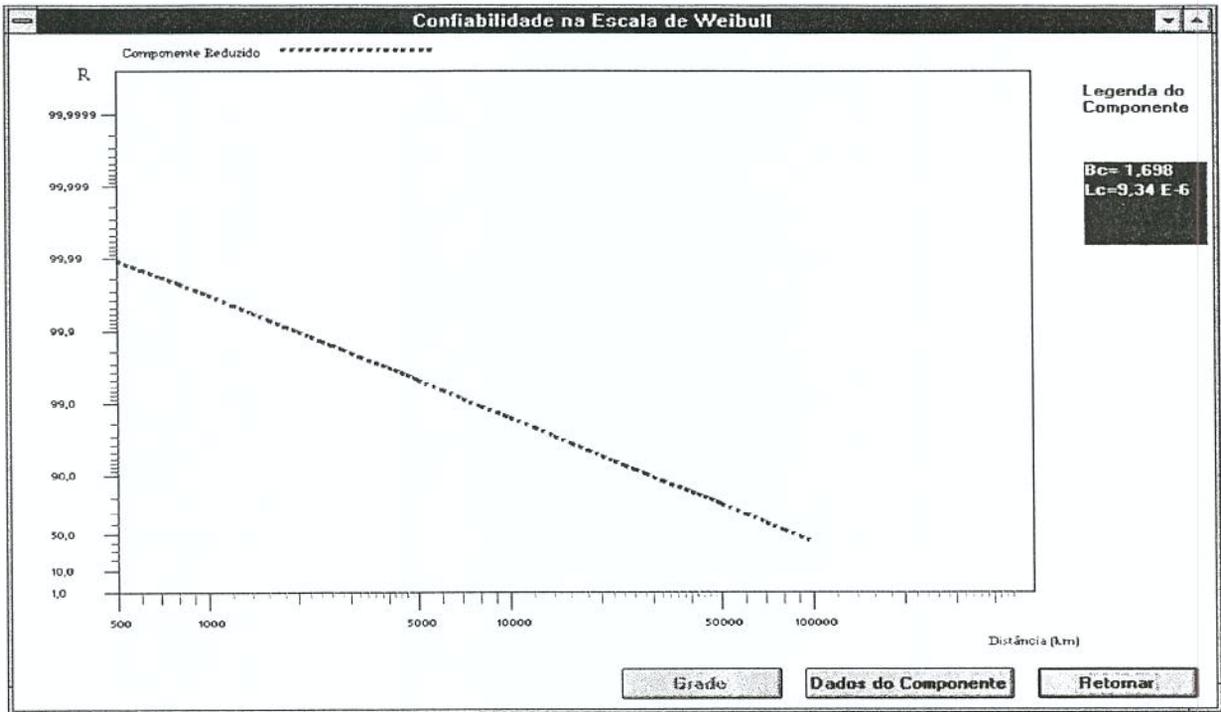


Figura 8. 25 Gráfico da confiabilidade na escala de Weibull para o componente reduzido CRCG012

Tabela 8. 6 Funções confiabilísticas na escala de Weibull para o componente reduzido CRCG012

Dados do Componente Reduzido

Componente Reduzido
 Código: CRCG012 Descrição:
 Taxa de Falha: 9,339 $\times 10^{-6}$ /km
 Parâmetro de Forma: 1,698 Período: 100000 km

Nível 0 da árvore de composição

Nível Anterior	Próximo Nível
CRCG012	
----CRCG011	
----CRCG004	

Composição
 Tipo de Arranjo: Série
 2 itens bons em 2

Tabela de Cálculo para o Componente Reduzido

km	R	F	tif	fdp
500	0,9998830	0,0001170	3,75 E-7	3,75 E-7
1000	0,9996345	0,0003655	6,09 E-7	6,08 E-7
5000	0,9946374	0,0053626	1,87 E-6	1,86 E-6
10000	0,9827158	0,0172842	3,03 E-6	2,98 E-6
50000	0,7564653	0,2435347	9,32 E-6	7,05 E-6
100000	0,3914193	0,6085807	1,51 E-5	5,92 E-6

Componente Retornar

Na Tabela 8. 6 têm-se as informações relativas à taxa de falha e ao parâmetro de forma do componente reduzido e, ainda, os valores da confiabilidade (R), da não-confiabilidade (F), da taxa instantânea de falha (tif) e da função densidade de probabilidade de falha (fdp) para as distâncias que estão destacadas no gráfico. Evidentemente esses resultados são dependentes das taxas de falha e dos parâmetros de forma que foram adotados para os itens relacionados na tabela 8 2. A composição do componente reduzido CRCG012 pode ser obtida através do campo composição. Nele vem explicitado o tipo de arranjo e os itens que participam desse arranjo, para o nível zero (0), que corresponde ao último nível da composição, feito na “sétima redução” da figura 8.5. Os outros níveis podem ser obtidos pelo botão “próximo nível”. Através dele caminha-se na árvore de composição dos componente reduzidos, recuperando cada uma das composições feitas, até que no último nível obtenha-se, unicamente, componentes do tipo (CO), relativos à “primeira redução”. Pela botão “nível anterior” faz-se o caminho de volta.

Analisando o modelo confiabilístico da figura 8.5, observa-se que o componente reduzido CRCG009, que sintetiza a atuação mecânica, o componente reduzido CRCG004, responsável pela acumulação e distribuição da pressão pneumática e o componente CO09, cilindro de membrana são muito significativos para o freio dianteiro. Deve-se então estudá-los mais detalhadamente, avaliando qual desses itens precisa ter investimento a fim de reduzir a taxa de falha e melhorar o parâmetro de forma.

Na Figura 8. 26 tem-se a distribuição da confiabilidade para a distância percorrida de 100.000km, e na Figura 8. 27 tem-se a função densidade de probabilidade de falha para a distância percorrida de 300.000 km. Essa distância foi aumentada para melhorar a análise. Observa-se que o item CRCG009 (linha preta) tem taxa de falha mais alta, repercutindo num comportamento ruim, no que se refere à confiabilidade, quando comparado com os outros itens. Do ponto de vista de projeto, esse é o que requer maior investimento, a fim de melhorar a confiabilidade do circuito do freio dianteiro. Pelos dados, pode-se dizer que há necessidade de investimento no controle do processo de produção (aumentar o parâmetro de forma) e melhorar tecnologicamente o produto (diminuir a taxa de falha) a fim de deslocar para a direita a função densidade de probabilidade de falha (Figura 8. 27).

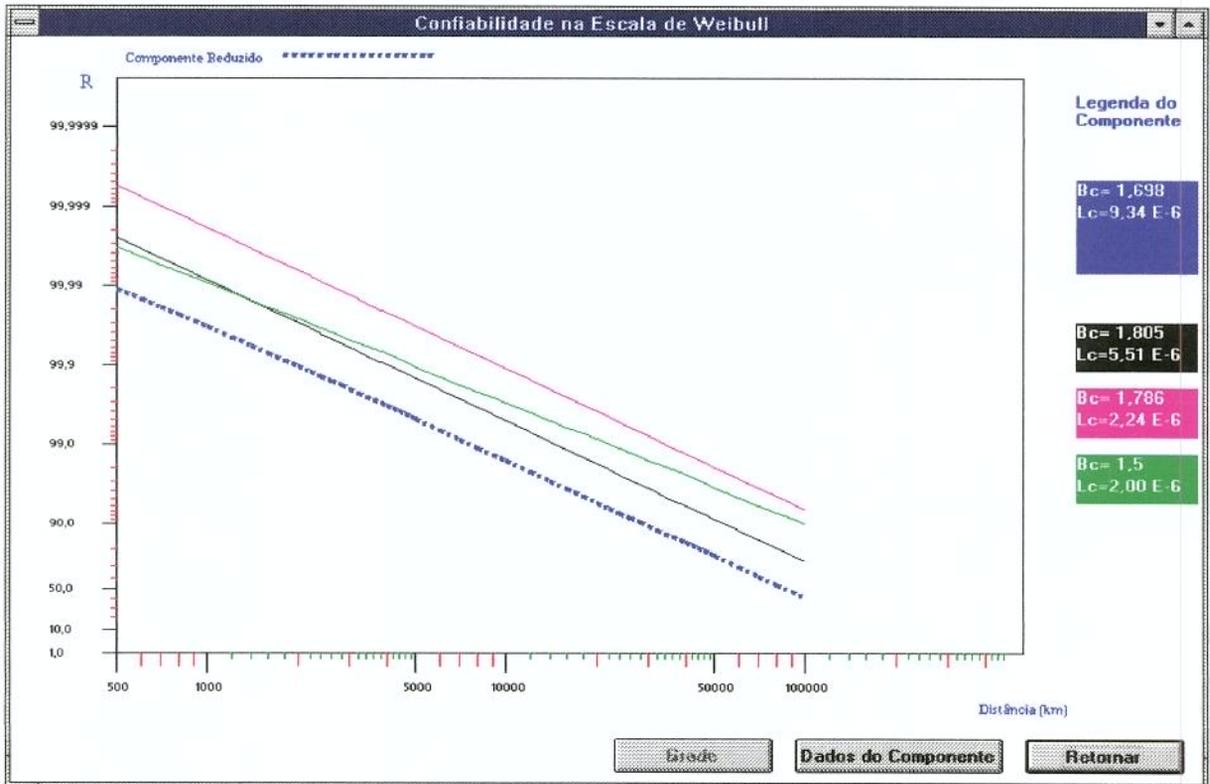


Figura 8. 26 Confiabilidade do CRCG012 (linha azul), CRCG009 (linha preta), CRCG004 (linha rosa) e CO09 (linha verde)

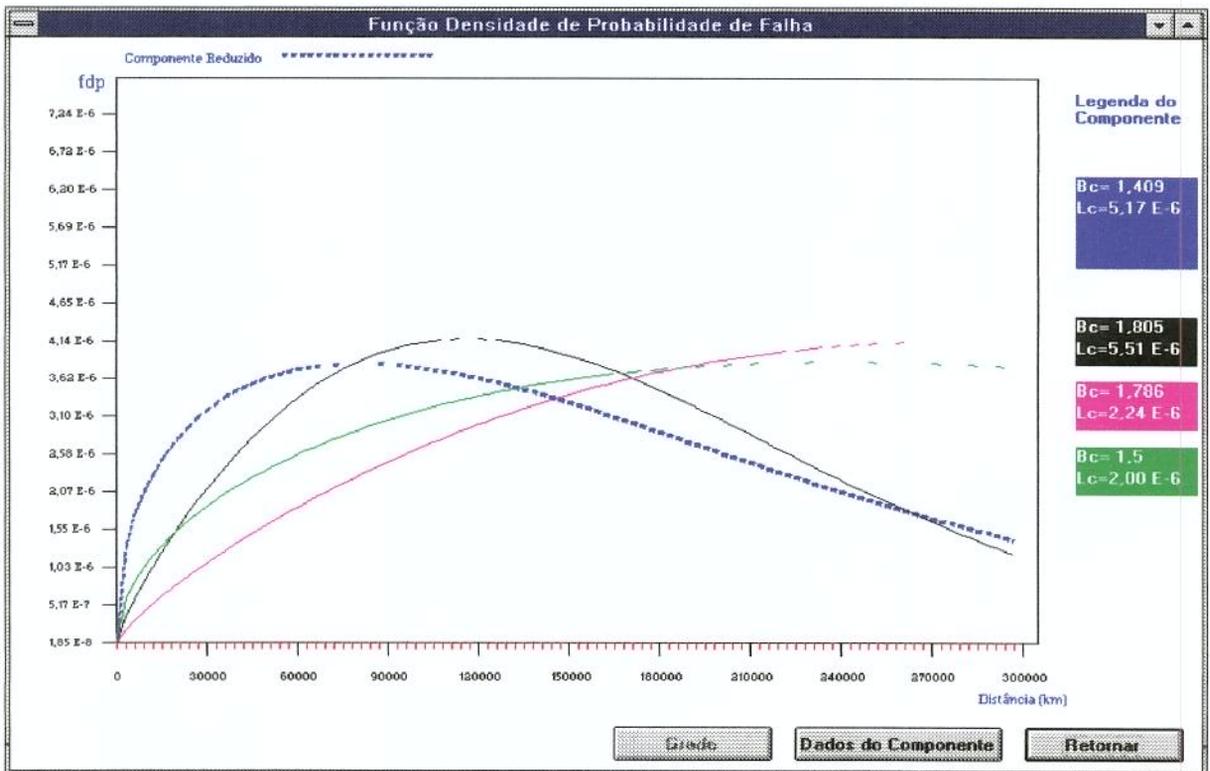


Figura 8. 27 Função densidade de probabilidade de falha (fdp) para os componentes reduzidos CRCG012 (linha azul), CRCG009 (linha preta), CRCG004 (linha rosa) e CO09 (linha verde)

Da mesma forma, pode-se obter os gráficos e as tabelas com os resultados dos cálculos para o componente reduzido CRCG016, do subcircuito do freio traseiro (figura 8.6); o componente reduzido CRCG021, do subcircuito do freio de emergência e estacionamento (figura 8.7); e o componente reduzido CRCG024, para o subcircuito do freio motor e auxiliares (figura 8.8).

8.5.2 Funções confiabilísticas para o circuito principal: ANÁLISE 1, ANÁLISE 2, ANÁLISE 3.

Nessa análise serão obtidos as funções confiabilidade e densidade de probabilidade de falha, na escala linear, do componente reduzido CRCG027, síntese da redundância ativa do freio motor e emergência em relação ao freio de serviço, do CRCG029 síntese da redundância passiva, em que foi considerado o CRCG026 igual ao CCRCG025 e o motorista como comutador perfeito. Será obtido também as funções confiabilísticas do componente reduzido CRCG031 que repete o caso anterior, tendo nesse caso, o CO14 como comutador real. As mesmas funções serão igualmente obtidas para o componente reduzido CRCG025, que é o componente síntese do circuito de freio de serviço (figura 8.9). Esses componentes reduzidos serão comparados com o componente reduzido do circuito geral para, análise 1 CRCG028 (figura 8.10). Na Figura 8. 28 apresenta-se as diversas distribuição de confiabilidade para os itens citados. Vê-se que os arranjos que foram redundados tem um significativo ganho de confiabilidade em relação ao CRCG025, utilizado como referência para as composições, como pode ser visto nas análises propostas no modelo confiabilístico. De outra forma, esses resultados estão expressos na figura 8.28.

Na Tabela 8. 7, mostra-se os valores da confiabilidade, da não-confiabilidade, da taxa instantânea de falha e da densidade de probabilidade para todos os pontos que estão destacados na escala da abcissa das figuras Figura 8. 28 e figura 8.29, para o CRCG028. Veja-se que esse item já tem uma composição em série com o item CRCG003. Isso produz uma diminuição da confiabilidade.

Para os subsistemas de “atuação” e para os grupos de função a mesma análise pode ser feita, comparando os subsistemas ou grupos de função entre si ou em relação a qualquer componente síntese, proposto na análise do circuito principal.

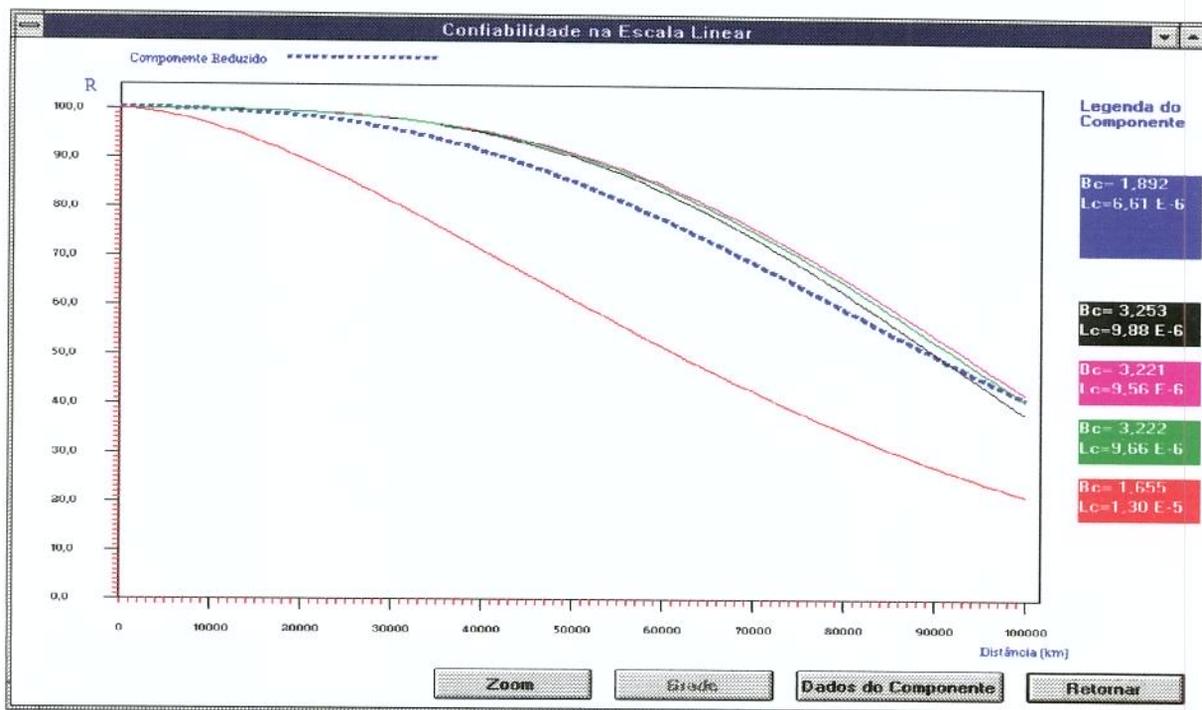


Figura 8. 28 Função confiabilidade para os componentes reduzidos CRCG028 (linha azul), CRCG027 (linha preta), CRCG029 (linha rosa) e CRCG031 (linha verde) e CRCG025 (linha vermelha)

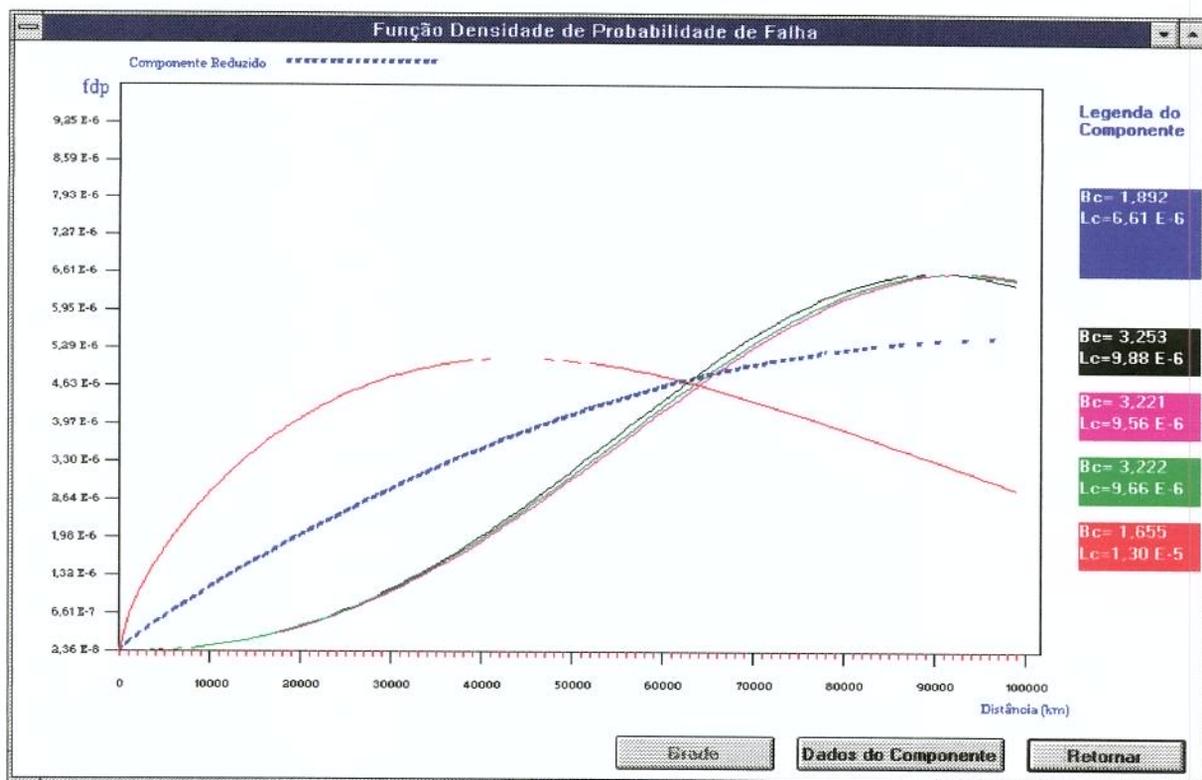


Figura 8. 29 Função densidade de probabilidade de falha (fdp) para os componentes reduzidos CRCG028 (linha azul), CRCG027 (linha preta), CRCG029 (linha rosa) e CRCG031 (linha verde) e CRCG025 (linha vermelha)

Tabela 8. 7 Funções confiabilísticas na escala linear para o componente reduzido CRCG028

Dados do Componente Reduzido

Componente Reduzido
Código: CRCG028 **Descrição:**
Taxa de Falha: 6,61 $\times 10^{-6}$ /km
Parâmetro de Forma: 1,892 **Período:** 100000 km

Nível 0 da árvore de composição

Nível Anterior	Próximo Nível
CRCG028	
-----CRCG027	
-----CRCG003	

Composição

Tipo de Arranjo: Série

2 itens bons em 2

Tabela de Cálculo para o Componente Reduzido

km	R	F	tif	fdp
10000	0.9958857	0.0041143	1.11 E-6	1.10 E-6
20000	0.9832798	0.0167202	2.06 E-6	2.02 E-6
30000	0.9571512	0.0428488	2.95 E-6	2.83 E-6
40000	0.9136027	0.0863973	3.82 E-6	3.49 E-6
50000	0.8517603	0.1482397	4.66 E-6	3.97 E-6
60000	0.7739727	0.2260273	5.48 E-6	4.24 E-6
70000	0.6850028	0.3149972	6.29 E-6	4.31 E-6
80000	0.5907608	0.4092392	7.08 E-6	4.18 E-6

Componente
Retornar

8.6 Comentário

A análise confiabilística requer dos analistas razoável conhecimento de todas as variáveis que estão associadas ao sistema em questão.

O estudo do modelo físico e a definição das condições de falha devem ser feitas com profundidade, para que o modelo confiabilístico represente o que, efetivamente, deve ser analisado.

Os resultados obtidos, nesse caso apresentado, dependeram do programa computacional, que por sua vez depende, fundamentalmente, das etapas anteriores. Todas as informações que foram definidas no modelo confiabilístico, podem ser recuperadas e processadas através do programa. De acordo com o que foi definido no capítulo 6, essas informações podem ser tratadas para realimentar a análise ou já serem usadas na melhoria do projeto ou dos procedimentos operacionais.

Os resultados dos cálculos das funções confiabilidade e não-confiabilidade são valores exatos, obtidos de acordo com as equações definidas no modelo matemático. Para as funções taxa instantânea de falha (tif) e densidade de probabilidade de falha (fdp), os resultados dependem do cálculo da taxa de falha e do parâmetro de forma, que são calculados pelo método dos mínimos quadrados. Como visto no capítulo 3, esse método resulta, normalmente, numa certa dispersão, que é definido pelo coeficiente de correlação (r). Devido a esse fator, a taxa instantânea de falha e a função densidade de probabilidade de falha, são valores dependentes do grau de precisão do método dos mínimos quadrados, e esse, por sua vez, depende dos dados de entrada.

Capítulo 9

Resultados e Conclusões

9.1 Análise dos resultados

A análise dos resultados deve considerar o delineamento preciso, conciso, compreensível e correto do modelo do mundo real[82]. Portanto, é de fundamental importância conhecer os requisitos e o ambiente do mundo real, destacando o que se deseja priorizar, no que se refere à análise. No primeiro momento, deve-se apenas abstrair as principais características desse mundo real, deixando os pequenos detalhes para mais tarde.

Foi com essa visão que se desenvolveu a metodologia para análise da confiabilidade de freios pneumáticos automotivos objetivando dar o primeiro passo para melhorar a qualidade temporal desses sistemas, a partir de uma estratégia de alto nível. A estratégia implementada resultou na reorganização do sistema principal de freio em subsistemas, subcircuitos, grupos de funções e componentes. A metodologia foi desenvolvida para trabalhar em sistemas mecânicos já existentes, ou seja, que tenha no mínimo o projeto detalhado já elaborado. No caso dos freios pneumáticos o projeto detalhado foi representado pelo modelo físico, como explicitado no capítulo 6 e, como diz Back[19], representa “uma síntese geral” do sistema de freio pneumático automotivo.

Dentro desse contexto, alguns resultados devem ser destacados:

- A metodologia proposta e aplicada no estudo de caso (capítulo 8) facilitou a divisão dos vários itens que foram necessários para a análise confiabilística.
- O programa computacional se constituiu numa interface apropriada para o “estudo de caso”, facilitando a interação entre o sistema analisado e o analista, gerando

informações que contribuem para a orientação dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

- O cálculo dos parâmetros da equação de Weibull para o componente equivalente (subcapítulo 4.3.2) apresentou variações percentuais muito pequena. No entanto, no cálculo da taxa de falha e no cálculo do parâmetro de forma para componentes reduzidos, na composição de arranjos sucessivos, apresentaram pequenas variações nos seus resultados, na medida em que se variava o período de uso. Esses erros dependem também dos dados de entrada e do nível em que se encontra o componente reduzido, no arranjo.
- A variação sobre a taxa de falha e o parâmetro de forma têm conseqüências, também, sobre o cálculo da confiabilidade de arranjo paralelo passivo, constituído de itens diferentes, com comutador real, definido pela equação geral (4.44). Os termos da equação, que são expressos pela equação da confiabilidade de Weibull (R_{CRA} e R_{CRB}), são obtidos através de cálculos exatos da confiabilidade, isto é, em função dos dados de entrada dos itens que constituem os componentes reduzidos, representados por R_{CRA} e R_{CRB}). Os termos relativos aos parâmetros de forma e taxa de falha, na segunda parcela da equação, são determinados através dos mínimos quadrados que, como já comentado, geram erro. Esse erro interfere no resultado da equação, produzindo em alguns casos, confiabilidade maior do que unidade. Esse tipo de erro aparece nesse caso, porque a rotina de cálculo está assumindo resultados de dois diferentes processos de cálculo. Quando os dados de entrada da equação têm a mesma origem, esse problema não ocorre.

9.2 Conclusões

9.2.1 Quanto aos objetivos

Concluiu-se que os resultados da pesquisa confirmaram as proposições apresentadas, quando se define os objetivos do trabalho, explicitados no subcapítulo 1.3, na medida em que:

- A metodologia desenvolvida no capítulo 6, e aplicada no estudo de caso (capítulo 8), permitiu obter todas as variáveis indispensáveis à análise das funções confiabilísticas, através da distribuição probabilística e bi-paramétrica de Weibull, dos itens

(componentes, subcircuitos, subsistemas de atuação e grupos de função) que constituem o sistema de freio pneumático automotivo.

- O programa computacional BRAKEREL (*Brake Reliability Program*) se insere na metodologia e responde aos principais requisitos utilizados na análise confiabilística, tais como: geração de banco de dados, importação e exportação de banco de dados, determinação dos parâmetros da equação de Weibull, através das informações dos banco de dados e, finalmente, diversas possibilidades de análises das funções confiabilísticas, sendo os cálculos expressos na forma de tabelas ou de gráficos, tanto na escala de Weibull quanto na linear.
- O programa computacional é compatível com plataformas “PC” e foi desenvolvido em ambiente “Windows”, orientado a eventos, e sendo programado para admitir implementações futuras, sem alterar a estrutura básica de programação.
- O modelo confiabilístico do sistema de freio pneumático, baseado na análise funcional do modelo físico, e construído a partir das recomendações normatizadas para as condições normais do freio de serviço, emergência/estacionamento e freios auxiliares, demonstrou que a árvore de falha do circuito de freio pneumático automotivo é do tipo série.
- A falha de circuitos de freio pneumático automotivo, em condições normais de uso é primordialmente paramétrica, principalmente, para os circuitos dotados de válvula de 4 circuitos.

9.2.2 Quanto à segurança veicular

Para a determinação da metodologia de análise de sistemas pneumáticos foi necessário localizar o freio dentro da problemática da segurança veicular, das especificações de normas técnicas para as condições normais de serviço, das informações estatísticas e das equações matemáticas existentes e apropriadas para o método de análise. A incursão por esse vasto campo de conhecimento permitiu concluir, também, que:

Capítulo 10

Sugestões para próximos trabalhos

Nesse capítulo, pretende-se pontuar alguns tópicos que estão inseridos na metodologia proposta e que, ainda, necessitam de investigações mais profundas:

- implementar no programa BRAKEREL bancos de dados e rotinas de cálculos para determinar o parâmetro de forma e a taxa de falha de itens que foram submetidos a ensaios acelerados (incompleto, uni-censurado, “morte-súbita” etc.);
- fazer levantamento de dados de falha, dos itens relacionados com a segurança veicular;
- fazer estudos, através de métodos de ensaios acelerados, para itens do circuito de freio pneumático, a fim de determinar experimentalmente os parâmetros da equação de Weibull;
- implementar novos arranjos, do tipo compostos e complexos, para o cálculo das funções confiabilísticas de outros sistemas mecânicos;
- implementar a composição de arranjos redundantes, levando em consideração o conceito de falhas dependentes;
- determinar equações para calcular a confiabilidade de componentes reduzidos, de arranjos do tipo paralelo ativo, para qualquer combinação de K itens bons em N itens, diferentes ou não;
- determinar equações para calcular a confiabilidade de componentes reduzidos, de arranjos do tipo paralelo passivo para K itens bons em N , de itens e comutadores diferentes;

- Os dados apresentados no capítulo 2, sobre acidentes de trânsito no Brasil e as condições de manutenção dos itens relacionados com a segurança veicular, embora distintos, estão relacionados.
- Viu-se pela pesquisa do DEKRA sobre acidentes de trânsito, oriundo de falhas catastróficas dos itens ligados à segurança veicular, na Alemanha[40], que os freios foram responsáveis por 66% dos acidentes com caminhões e em mais de 50 % dos acidentes com automóveis e ônibus. No Brasil, as pesquisas sobre acidentes nas rodovias indicaram que ônibus e caminhões se envolveram, em pelo menos, 40 % desses acidentes. Dadas as condições de manutenção da frota automotiva brasileira, citado no capítulo 2, pode-se inferir que, no Brasil, a ocorrência de falhas catastrófica, seria ainda maior.
- A estimativa de confiabilidade de 99,99% contra a falha catastrófica para a frota de veículos automotivos do Brasil, feita no capítulo 3, demonstra que essa é uma boa referência, já que índices menores de confiabilidade indicaram alta probabilidade de falha. Por essas estimativas, as perspectivas da legislação sobre a obrigatoriedade de vistoria periódica da frota de veículos, faz sentido.
- O sistema de freio, pela sua complexidade e sua importância para a segurança veicular, deve efetivamente receber tratamento diferencial quanto à pesquisa e desenvolvimento tecnológico, baseado nos conceitos da qualidade temporal. Pode-se concluir que o quadro caótico das condições de manutenção, estão fortemente associados ao projeto do sistema de freio como um todo.
- As normas Brasileiras carecem de informações sobre as condições de falha paramétrica e falhas catastróficas dos itens.

Conclui-se, finalmente, que a escolha do tema foi acertada pela sua atualidade e grande alcance social, na medida em que o número de acidentes provocados por veículos automotivos é uma endemia que vem aumentando em todo o mundo.

- desenvolver e implementar métodos mais precisos para obter os parâmetros da equação de Weibull, de maneira a diminuir os desvios que ocorrem nos cálculos do parâmetro de forma e da taxa de falha, dos componentes equivalentes e, principalmente, dos componentes reduzidos;
- fazer as implementações, no programa BRAKEREL, para determinar a função mantabilidade e a disponibilidade, com o propósito de obter a qualidade temporal dos circuitos de freios pneumáticos automotivos.

Referências Bibliográficas

1. AFNOR France. *X 06-501. Applications de la statistique - introduction la fiabilité.* France: Sept./1984.
2. ALMEIDA, N.M.de., *Gramática metódica da língua portuguesa.* São Paulo: Saraiva, 31^a Ed. 1982.
3. APOSTILA técnica de instrução. São Paulo: *Indústria Freios Knorr Ltda.* 1993. (n.CK.10/8601, n.CK.8/8305).
4. ALVES, I.M., *Neologismo - criação lexical.* São Paulo: Ática. 1990, 93p.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 5462, Confiabilidade - terminologia.* Rio de Janeiro, 1981.17p.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 6534, Cálculo de estimativas por ponto e limites de confiança resultante de ensaios de determinação da confiabilidade de equipamentos - Procedimento.* Rio de Janeiro, 1986. 33p.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 6742, Utilização da distribuição de Weibull para interpretação dos estágios de durabilidade por fadiga - procedimento.* Rio de Janeiro, 1987. 18p.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 9320, Confiabilidade de equipamentos, recomendações gerais - procedimento.* Rio de Janeiro 1986. 34p.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 9321, Cálculo de estimativas por ponto e limites de confiança resultante de ensaios de determinação de confiabilidade de equipamentos - procedimento.* Rio de Janeiro, 1986. 34p.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 9322*, Apresentação de dados de confiabilidade de componentes (ou itens) eletrônicos - procedimento. Rio de Janeiro, 1986. 24p.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 9325*, Confiabilidade de equipamentos - Planos de ensaio de conformidade para taxa de falhas e tempo médio entre falhas admitindo-se taxa de falha constante - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986. 31p.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro *NBR 10.966*, *Desempenho de sistema de freio para veículos rodoviários*. Rio de Janeiro, 1989, 16p.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR-10.967*, *Sistema de freio para veículos rodoviários - ensaio de desempenho*, método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991. 11p.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 10.968*, *Sistema de freio para veículos rodoviários - Medição do tempo de resposta para os veículos equipados com freio pneumático - desempenho*, método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989. 8p.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 10.969*, *Desempenho de sistema de freio para veículos rodoviários - Prescrições relativas às fontes e aos reservatórios de energia - procedimento*. Rio de Janeiro, 1989. 4p.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 10.970*, *Desempenho de sistema de freio para veículos rodoviários - prescrições relativas às condições específicas para o freio de mola acumuladora - câmara combinada de freio*. Rio de Janeiro, 1989. 3p.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *NBR 10.971*, *Desempenho de sistema de freio para veículos rodoviários - distribuição das forças de frenagem entre os eixos veiculares*. Rio de Janeiro, 1987. 20p.
18. AURÉLIO., B.de H.F., Novo dicionário da língua portuguesa. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira S.A. 2ª Edição. 1986.
19. BACK, N., *Metodologia de projeto de produtos industriais*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois. 1983. 389p.
20. BILLINTON, R., ALLAN, R.N., *Reliability evaluation of engineering systems*. London: Plenum Press. 1983, 349p.

21. BOMPAS-SMITH, J.H., *Mechanical Survival: the use of reliability data*. London: R.H.W. Brook. 1973. 198p.
22. BRUNNER, F. J., Reliability approach for vehicle safety components. *Quality and Reliability Engineering International*, 1989. v. 5, p.291-297.
23. CARVALHO, T.C.C., Medidas obrigatórias para componentes veiculares com responsabilidade para segurança. *Simpósio de Engenharia Automotiva*. 1988. São Paulo. AEA- Associação Brasileira de Eng. Automotiva, 1988. p.21/4..
24. CASCONI, N.R., *Metodologia para análise e otimização da confiabilidade, da manutenibilidade e da disponibilidade de um processo contínuo de produção*. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1992. 218p. Dissertação (Mestrado)
25. CASCONI, N.R., FAGUNDES, E.C, Processo de implantação de um programa de análise e otimização da confiabilidade de um processo contínuo de produção. *IV Encontro técnico sobre Engenharia da Confiabilidade -ETEC 4*. PETROBRAS. Rio de Janeiro. ago. 1995. p.231-242.
26. CATINI, A.D., Limitador de velocidade para veículos comerciais. VIII SIMEA. *Simpósio de Engenharia Automotiva*. AEA. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva. São Paulo. SP. ago. 1995. p.406-412.
27. CĂTUNEANU, V.M., MIHALACHE, A.N., *Reliability fundamentals*. Amsterdam: Elsevier. 1989. Cap.1, 2, 3: p.3-96.
28. CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO - CONTRAN. Resolução CONTRAN nº 809, de Dezembro de 1995. *Diário Oficial da União* de 22/12/95.
29. CUNHA, C.F.da., *Gramática da língua portuguesa*. Rio de Janeiro: FENAME. 6ª ED. 1980.
30. DHILLON, B.S., Reliability testing: bibliography. *Microelectron. Reliab.*, v.32, n.8, p.1115-1135, 1992.
31. DIAS, A., Confiabilidade de freios automotivos. VIII SIMEA. *Simpósio de Engenharia Automotiva*. AEA. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva. São Paulo. SP. ago. 1995. p.1-10.
32. DIAS, A., Confiabilidade em freios. *1ª Colloquium de Freios da SAE BRASIL*. Caxias do Sul. RS. nov. 1995. (palestra)

33. DOTY, L.A., *Reliability for the technologies*. AN.ASQC Quality Press Book. Industrial Press Inc. 1989, 307p.
34. ECE. *ECE -R 13*. Stuttgart: Mercedes Bens AG, 1991. 168p.
35. FIOD Neto, M., *Desenvolvimento de sistema computacional para auxiliar a concepção de produtos industriais*. Florianópolis, SC: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 1993. Tese (Doutorado)
36. FREIOS a ar. *Allied Automotive - Divisão Bendix do Brasil. Centro de treinamento*. São Paulo. SP: 1991. 24p.
37. FUNCIONAMENTO e manutenção de sistemas de freio a ar. Campinas: *Ideal Standard WABCO Indústria e Comércio Ltda*. 1993.
38. GALETO, F., *Affidabilità: teoria e metodi di calcolo*. Padova, Italy: Cleup editore. Volume primo. 1981. 183p.
39. GIACHINO, J.M., Smart sensors for automotive applications. *Electrical and Electronics Division Ford Motor Company. Michigan*: 1991. p.2-10.
40. GIONET, P.A., *Fundamental techniques in analysing fatigue experiments Using the Weibull Distribution*. Reliability Group Chevrolet Engineering Center. 1965.
41. GIRALDES, C., TAKETANI, T., Aspectos estatísticos dos acidentes de trânsito relacionados aos componentes de segurança veicular. *Simpósio de Engenharia Automotiva*. 1988. São Paulo: AEA- Associação Brasileira de Eng. Automotiva, 1988. p.5-17.
42. GÖHRING, E., VON GLASNER, E.C., Contribution to the improvement of the braking and handling performance of commercial vehicles. *23 FISITA*. Mercedes Bens. Torino: May 1990. p.271-277. (905039)
43. GRANDEL, J., BERG, F.A., Technical defects in passenger and commercial vehicles - Results of examinations of vehicles involved in accidents compared with results of periodic, technical monitoring of vehicles. *23 FISITA*. Torino: May 1990. p.921-930. (905120)
44. GREEN, A.E., BOURNE, A.J., *Reliability technology*. London: Wiley Interscience. 1972, 634p.
45. GUIDO, C.A.P., *Ensaio Acelerados: uma nova metodologia*. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1994. 63p. Dissertação (Mestrado)

46. HALLINAN, A.J.Jr., A review of the Weibull distribution. *Journal of Quality Technology*. v.25, n.2, p.85-93, April 1993.
47. HOLZNER, S. *Visual Basic for Windows*. Versão 3.0. Rio de Janeiro: Campos. 1994. 673p.
48. HOUAISS, A., Dicionário inglês-português. Rio de Janeiro: Record. 1982
49. HSIEH, P.I., LU, M.W., Reliability estimation and failure prediction of vehicle systems and components. *SAE Technical Paper Series*. N. 901740. p.1-8. 1990.
50. ISO/DIS - 115009. *Road Vehicles - Towed vehicles equipped with compressed air braking system and anti-lock brakes - Measurement of braking performance*. Feb.1993
51. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURANÇA NO TRÂNSITO - INST. *Pesquisa das condições de manutenção de veículos de carga da frota de São Paulo*. São Paulo, SP: 1993.
52. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURANÇA NO TRÂNSITO - INST. *Pesquisa das condições de manutenção de veículos leves da frota da grande São Paulo*. São Paulo, SP: 1993.
53. JARDINE, A.K.L., Equipment reliability and maintenance. *European Journal of Operational Research*, p.285-296. 1985.
54. KECECIOGLU, D.B., SUN, F.B., The State-Of-The-Art of reliability engineering in the U.S.A. *IV Encontro Técnico sobre Engenharia da Confiabilidade*. Rio de Janeiro. p.59-85. ago. 1995.
55. KREYSZIG, E., *Introductory mathematical statistics: principles and methods*. New York: John Wiley & Sons. 1970. 467p.
56. LEWIS, E.E., *Introduction to reliability engineering*. New York: John Wiley & Sons. 1987, 398p.
57. LUCCHESI, D., *Corso di tecnica automobilistica*. Milano, Italy: Editore Ulrico Hoepli. 3ª Edizione. 1989.
58. MANUAL de oficina. Campinas: Mercedes-Benz do Brasil S.A. v.1. ago. 1992. (Cod. 09 924 941)
59. MANUAL de serviço - caminhões. Volvo do Brasil - motores e veículos S.A. 1993. (TP. 60.550, TSP 60.560, TSP 60181)

60. MANUAL de serviço - ônibus. *Volvo do Brasil - Motores e Veículos S.A.* 1993. (TP. 60.507)
61. MENDES, R.B.G., *Metodologia para a determinação da confiabilidade operacional de equipamentos durante o período de garantia.* Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1993. 151p. Dissertação (Mestrado)
62. MEYER, P.L., *Probabilidade: aplicações à estatística.* Rio de Janeiro: Ao livro Técnico S.A. 1973. 391p.
63. MONCHY, F., *A função manutenção.* São Paulo: Ebras/Durban. 1989. 424p.
64. MOURA, Eduardo C., How to determine sample size and estimate failure rate in life testing. *American Society for Quality Control. Statistics Division.* v.15. 1991.
65. MOURA, H., *Doutor em lingüística pela UNICAMP e professor da Universidade Federal de Santa Catarina.* 1996. (informação verbal)
66. MÜLLER, R., SCHWARZ, E., *Confiabilidade.* São Paulo: Nobel. 89p.
67. NATUREZA da ocorrência de veículos envolvidos em acidentes nas estradas de São Paulo. *Secretaria Estadual de Trânsito do Estado de São Paulo. Comando da Polícia Rodoviária, Setor de Informática.* Abril. 1996.
68. O'CONNOR. P.D.T., *Practical Reliability Engineering.* New York: John Wiley & Sons. 1989. 396p.
69. ORTHEWEIN, WC., *Clutches and Brakes : design and selection.* New York: Marcel Dekker. 1986.
70. OXFORD. *Advanced Learner's Dictionary.* Oxford: Oxford University Press. 1995.
71. PALLEROSI, C.A., *Confiabilidade em projeto mecânico.* Apostila do curso de confiabilidade. Departamento de Projeto Mecânico/FEM/UNICAMP. 1992.
72. PALLEROSI, C.A., *Confiabilidade de componentes e sistemas.* Fascículo 12. Campinas: UNICAMP. 1995. (Notas preliminares)
73. PALLEROSI, C.A., FAGUNDES, H.C., RAMP - Reliability, availability, maintainability program. *DPM/FEM/UNICAMP.* 1994.

Referências Bibliográficas

74. PALLEROSI, C.A., PAONE, N., Sensor as elements to increase reliability of mechanical components. In: *Mechanical Systems, Material and Quality*. Nov. 1990. Ancona, Italy. Proceedings of the Joint Seminar. 1990. 15p.
75. PALLEROSI, C.A., PAONE, N., Affidabilità dei sistemi di freno per automobile. *Quaderno del Dipartimento di Meccanica*. Ancona. Italy. Gennaio 1991. 35.
76. PARK, K.S., *Human reliability: analysis, Prediction, and Prevention of Human Errors*. Amsterdam: Elsevier. 1987. 338p.
77. RELATÓRIO de informações sobre acidentes/feridos/mortos e multas. Brasília, DF: *Ministério da Justiça. Secretaria de Planejamento de Ações Nacionais de Segurança Pública, Departamento de Polícia Rodoviária Federal, Coordenação Geral de Operações*. mar. 1996.
78. RAMAKUMAR, R., *Engineering reliability: fundamentals and applications*. New York: Prentice-Hall International, Inc. 1993. 482p.
79. RAO, S.S., TJANDRA, M., Reliability based design of automotive transmission systems. *Reliability Engineering and Systems Safety*. v. 46. p. 159-169. 1994.
80. REYS, M.A., *Determinação de critérios para a escolha de metodologias de manutenção*. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1995. Dissertação (Mestrado)
81. ROSA, E., Aplicação de confiabilidade no projeto de componentes automotivos. São Paulo: SAE. p. 673-689. 1991.
82. RUMBAUGH, J., et. alli. *Modelagem e projetos baseados em objetos*. Rio de Janeiro: Editora Campus. 1994. 652p.
83. RUST, S.W., RICE, R.C., Statistical distributions. *Metal Handbook*. 9 Ed. v.8. Mechanical Testing. p.628-638.
84. SERVICE manual. *Grey-Hock heavy duty brake. Brake Systems Division*. Trumbull: Raymark Industries, Inc. 96p.
85. SHIGLEY, J.E., *Mechanical engineering design*. First Metric Edition. New York: McGraw-Hill Book Company. 1986. p.182-226.
86. SISTEMA de freios e ar comprimido - caminhões. São Paulo: *Scania do Brasil Ltda. Divisão de Pós-venda*. 1994.

- 87.SISTEMA de freios e ar comprimido - ônibus. São Paulo: *Scania do Brasil Ltda. Divisão de Pós-venda*. 1994.
- 88.SWAN, T., *Programando em Pascal 7.0 para Windows Borland*. Rio de Janeiro: Berkeley. 1993. 676p.
- 89.WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* v.18. p.193-197.1951.
- 90.WHETTON, C., Approaches to process plant reliability, maintainability, availability, an safety. *IV Encontro Técnico sobre Engenharia da Confiabilidade*. Rio de Janeiro. p.279-305. Agosto 1995.
- 91.WHITMORE, N.W., *Applied statistics*. Boston: Allyn and Bacon. Fourth Edition. 1993. 989p.
- 92.VÁLVULA de sistema de freio a ar. *Vendas Varga e serviços*. Limeira: *Freios Varga*. 1992.