

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Modelos de Fiabilidade em Equipamentos Mecânicos

Filipe José Didelet Pereira

Porto 1996



Filipe José Didelet Pereira

Modelos de Fiabilidade

em

Equipamentos Mecânicos



21777

B6/PE12

F/V - capa a cores
enc em trâmico
Nuno Oliveira e Silva
~~Sábado~~ Quarto 18 horas

UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA
N.º 13994
CDU 621(043)
Data 04-11-1997

Tese submetida com vista à obtenção
do grau de Doutor em Engenharia Mecânica

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
DO PORTO

PORTO, 1996

Tese realizada com a orientação e o apoio dos Professores Doutores Luís
Andrade Ferreira e Armando Leitão

Ao Pedro

e

à Rita

Resumo

A Manutenção tem vindo a ser encarada nos últimos anos como uma das funções com mais potencialidades de, sendo optimizada, contribuir para a rentabilização da actividade das empresas.

O efeito da optimização da Manutenção aparece por via da redução das despesas de funcionamento visto que esta tarefa contribui com uma parcela muito significativa para o conjunto daquelas despesas.

Assume, assim, importância fundamental qualquer modelo que contribua para melhorar os processos de previsão da condição dos equipamentos e, através desta, da previsão da capacidade desses mesmos equipamentos produzirem produtos conformes com os padrões de qualidade impostos. Os modelos de Fiabilidade são uma ferramenta de qua a Manutenção dispõe com vista à prossecução daquele objectivo.

De entre os modelos de Fiabilidade existentes, os modelos não paramétricos permitem que não se imponham à partida quaisquer ajustamentos definidos para as funções de risco ou de fiabilidade e, entre esses modelos, o modelo dos riscos proporcionais permite equacionar em simultâneo vários factores influenciadores dos modos de avaria.

Neste trabalho aplica-se o modelo dos riscos proporcionais a dois tipos de equipamentos complexos em que as despesas de manutenção assumem valores significativos, um moinho de minério e um conjunto de rectificadoras de componentes para motores de automóveis.

O modelo dos riscos proporcionais, que implica que os riscos sejam proporcionais entre si de acordo com cada conjunto de valores das covariáveis que influenciam a ocorrência de avarias e com a influência relativa de cada uma delas, fornece uma previsão para a fiabilidade futura dos equipamentos a que é aplicado, podendo, com base nesses dados, o gestor de Manutenção definir de forma mais racional e optimizada as acções a desenvolver sobre esses equipamentos durante o período de tempo a que a previsão respeite.

Procede-se também, no caso das rectificadoras que maquinam balanceiros para condicionamento da abertura e fecho das válvulas, à utilização de

covariáveis variáveis no tempo e ao estabelecimento de uma relação entre a covariável definidora da condição e a covariável definidora da qualidade dos produtos produzidos, ambas necessariamente incluídas no modelo.

Faz-se, a terminar, uma resenha das vantagens e desvantagens da aplicação do modelo desde a definição das covariáveis e modos de avaria até à análise dos resultados.

Synopsis

Maintenance becomes, the last years, one of the most important functions in order to, if optimized, the increase of the companies activity profits.

The Maintenance optimization's makes its effects via the decreasing of the working expenses given that this task contributes in a large way to the whole general expense in the budget.

So, any model contributing to improve the processes of predicting the equipment's condition is a tool of the most importance and by the prediction of the equipment's condition we can predict the ability of those equipments to make products according the quality norms and demands. The Reliability models are a tool serving Maintenance so that those aims can be attained.

Among all the existing Reliability models, non parametric ones allow us do not need any fitment of a specific hazard or reliability function and among non parametric models the proportional hazards model allows the simultaneous evaluation of the several factors involved with the failure models.

In this thesis proportional hazards model is applied. Two kinds of complex equipments are treated and the Maintenance expenses concerning their use are very large in both cases. The equipments are a mine mill and four rectifiers to machine some components to car engines.

Proportional hazards model assumes that hazards are proportional one to the others according each group of covariate's values determining the fails and the relative contribution of each one of them to the fail's occurrence. The model predicts us the reliability of the equipments for the next future allowing, based on the covariates data, the Maintenance manager to define the actions to do in a rational and optimized way.

There are four rectifiers for two kinds of components. Proportional hazards model with time dependent covariates is applied to two of those machines, both working the same kind of component. A relationship between the condition covariate and the quality covariate, both in the model, is obtained.

To finish, a list of advantages and disadvantages of the model is made since the covariates and failure mode's definition to the result's analysis.

Abrégé

La fonction Maintenance a été envisagée, au cours de la dernière décade, et si elle est optimisée, comme une des fonctions ayant des grands potentialités quand à sa contribution pour la rentabilization de l'activité des entreprises.

L'effet de l'optimization de la Maintenance est devenu présent par la reduction des dépenses de fonctionnement car cette tâche contribue avec une très signifiante partie pour l'ensemble de celles dépenses là.

Alors, quelque modèle qui puisse contribuer pour l'amélioration des processus de prévision de la condition des équipements et, par cette prévision, aussi pour prévoir la capacité des équipements pour la production des biens conformes aux padrons de qualité imposés, a une importance fondamentale. Les modèles de Fiabilité constituent un outil dont la Maintenance peut disposer vue la prosscécution d'un objectif comme celui-là.

Parmi les modèles de Fiabilité qu'on peut trouver, les modèles non paramétriques nous permettent de ne pas imposer en avant des ajustements définis pour les fonctions de risque ou de fiabilité et, parmi ces derniers, le modèle des risques proportionnelles permet d'évaluer simultanément plusieurs facteurs influant les modes de défaillance.

Dans ce travail on applique le modèle des risques proportionnelles à deux types d'équipements complexes dont les dépenses maintenance ont une très grande valeur, un moulin de minerai et quatre rectifieuses de composants pour des moteurs d'automobile.

Dans le modèle des risques proportionnelles les risques sont proportionnelles les uns avec les autres selon chaque ensemble de valeurs des covariables influant l'occurrence des défaillances et l'influence relative de chacune de ces variables là. Ce modèle fournit une prévision pour la fiabilité future des équipements où il est appliqué et, avec les donnés qu'on obtient, le chef Maintenance peut améliorer les actions à entreprendre sur ces équipements pendant la période de la prévision.

On utilise aussi des covariables variant au long du temps et on établit un rapport entre la condition de l'équipement et la qualité des biens qu'il produit.

Pour terminer on fait un exposé des avantages et des inconvénients de l'application du modèle des risques proportionnelles depuis la définition des covariables et des modes de défaillance jusqu'à l'analyse des résultats.

Palavras chave

Manutenção

Fiabilidade

Taxa de risco

Modelo dos riscos proporcionais

Função de risco

Covariáveis

Coefficientes de regressão

Key words

Maintenance

Reliability

Hazard rate

Proportional hazards model

Hazard function

Covariates

Regression coefficients

Agradecimentos

Sendo difícil mencionar todos quantos, de uma forma ou de outra, contribuíram para a execução deste trabalho, quero começar por agradecer a todos os que se sintam esquecidos ao lerem o texto que figura nesta página.

Começo por manifestar o meu agradecimento aos Professores Doutores Luís Andrade Ferreira e Armando Leitão por toda a colaboração e incentivo que fui recebendo na pesquisa e na compilação das diferentes fases desta tese.

Agradeço ainda à Escola Superior de Tecnologia de Setúbal todos os meios que pôs à minha disposição, financeiros e materiais, e, particularmente, ao Professor Duarte Silva, que a dirigia à data de início destes trabalhos, por todo o interesse e incentivo sempre manifestados .

O trabalho não teria sido possível sem a colaboração da Renault Portuguesa, fábrica de Cacia, e, nomeadamente, do seu sector de Manutenção através dos Srs. Engenheiros Celso Santos e Alfredo Pereira.

Para a concretização do trabalho experimental foi fundamental a colaboração da MIIT, Manutenção Industrial Informatizada e Tecnologia Lda., especialmente por intermédio dos Srs. Engenheiros João Taborda Craveiro e Luís Mendonça.

Quero realçar também a colaboração de Pirites Alentejanas SA através do Sr. Engenheiro José Maria dos Santos.

Pelos esclarecimentos prestados e por todo o trabalho de revisão, um agradecimento muito especial para o Professor Doutor Júlio Montalvão e Silva que também desempenhou um papel determinante na fase de arranque.

O arranjo gráfico contou com a ajuda dos Engenheiros Nuno Pereira e Paulo Fontes e do Sílvio Costa. Para eles, também, o meu agradecimento.

Finalmente, um grande, muito grande, agradecimento à minha mulher que prestou todo o apoio de rectaguarda e soube ultrapassar todos os contratempos.

Índice

<i>Resumo</i>	<i>I</i>
<i>Synopsis</i>	<i>III</i>
<i>Abrégé</i>	<i>V</i>
<i>Palavras chave</i>	<i>VII</i>
<i>Key words</i>	<i>VII</i>
<i>Agradecimentos</i>	<i>VIII</i>
<i>Índice</i>	<i>IX</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>XV</i>
<i>Índice de tabelas</i>	<i>XVII</i>
1 - Apresentação e Introdução	1
1.1 - Objectivos e Introdução.....	1
1.2 - Conceitos gerais.....	3
1.2.1 - Manutenção.....	3
1.2.2 - Fiabilidade.....	6
1.2.3 - Avaria.....	7
1.2.4 - Taxa de avarias.....	8
1.2.5 - Taxa de risco.....	10
1.2.6 - Disponibilidade.....	12
1.3 - Modelos matemáticos em Manutenção.....	13
1.3.1 - Modelos referentes ao comportamento do material.....	14
1.3.2 - Modelos de organização.....	17
1.3.3 - Modelos de gestão.....	21
1.4 - A evolução das teorias de Fiabilidade.....	23

1.4.1 - Estatística e Fiabilidade.....	24
1.4.2 - A Fiabilidade e a concepção de equipamentos e sistemas.....	25
1.4.3 - Evolução dos métodos de Fiabilidade.....	26
1.4.4 - Bancos de dados de Fiabilidade.....	31
1.4.5 - Fiabilidade e Qualidade.....	33
1.4.6 - Componentes e sistemas reparáveis.....	36
1.4.7 - Técnicas de regressão.....	38
1.5 - Esquema do trabalho.....	39
2 - O modelo dos riscos proporcionais.....	43
2.1 - Introdução.....	43
2.2 - Características de outros modelos de Fiabilidade.....	45
2.2.1 - Modelos determinísticos.....	45
2.2.2 - Modelos estatísticos de fiabilidade.....	46
2.2.3 - Modelos funcionais.....	47
2.3 - Súmula bibliográfica de aplicações fiabilísticas.....	48
2.3.1 - Aplicações sem utilização dos riscos proporcionais.....	48
2.3.2 - Alguns casos de aplicação anterior do modelo de riscos proporcionais.....	51
2.4 - O modelo dos riscos proporcionais.....	55
2.5 - Os coeficientes de regressão.....	62
2.5.1 - Estimativas por verosimilhança	64
2.5.2 - Processos de estimação.....	66
2.6 - Funções de risco e de sobrevivência base.....	70
2.7 - Particularidades do modelo.....	72
2.7.1 - Estratificação.....	72
2.7.2 - Covariáveis mudas.....	73
2.7.3 - Testes de adequação por análise de resíduos.....	76
2.8 - Covariáveis variáveis no tempo.....	78
2.9 - Considerações gerais e conclusões.....	80

3 - Aplicação a um moinho autogéneo.....	91
3.1 - Introdução e apresentação.....	91
3.2 - O equipamento estudado.....	92
3.2.1 - Características.....	92
3.2.2 - Parâmetros considerados.....	94
3.2.2.1 - Parâmetros de funcionamento.....	94
3.2.2.2 - Parâmetros de condição.....	96
3.2.3 - Pontos de medição.....	98
3.3 - Obtenção dos dados.....	100
3.3.1 - Nível vibratório.....	100
3.3.2 - Carga e enchimento.....	102
3.3.3 - Formas de consideração das variáveis.....	106
3.3.3.1 - Carga e enchimento como variáveis.....	106
3.3.3.2 - Nível vibratório e pontos de medida.....	107
3.3.3.3 - Alinhamento.....	110
3.3.3.4 - Estado da observação.....	111
3.3.3.5 - Tempo de sobrevivência.....	112
3.3.3.6 - Resumo global de variáveis.....	113
3.4 - Resultados obtidos.....	114
3.4.1 - Nível vibratório.....	115
3.4.2 - Carga.....	120
3.4.3 - Aspectos gerais.....	128
3.5 - Análise dos resultados.....	130
3.6 - Conclusões.....	134
4 - Aplicação a máquinas ferramentas.....	139
4.1 - Introdução e apresentação.....	139
4.2 - Aplicação sem covariáveis dependentes do tempo.....	140
4.2.1 - O equipamento estudado.....	140
4.2.2 - Recolha de dados fornecidos.....	141
4.2.3 - Os modos de avaria.....	142
4.2.4 - Covariáveis consideradas.....	144
4.2.5 - Resultados obtidos.....	145

4.2.5.1 - Máquina.....	146
4.2.5.2 - Rugosidade.....	147
4.2.6 - Resultados globais.....	147
4.2.7 - Análise de resultados.....	149
4.2.8 - Validação dos resultados.....	151
4.3 - Aplicação com covariáveis dependentes do tempo.....	154
4.3.1 - As rectificadoras de balanceiros.....	154
4.3.2 - Recolha de dados fornecidos por Renault.....	157
4.3.3 - Recolha de dados obtidos por medição directa.....	158
4.3.4 - Enquadramento do problema.....	160
4.3.5 - A definição da covariável caracterizadora da condição.....	163
4.3.6 - A relação entre a rugosidade e o nível vibratório.....	176
4.3.7 - A rugosidade como covariável dependente do tempo.....	179
4.3.8 - Resultados obtidos.....	181
4.3.8.1 - O programa para a obtenção da função de sobrevivência.....	181
4.3.8.2 - Vibração a 25 Hz e aproximação exponencial.....	183
4.3.8.3 - Vibração a 25 Hz e aproximação linear.....	187
4.3.8.4 - Vibração a 50 Hz e aproximação exponencial.....	190
4.3.8.5 - Vibração a 50 Hz e aproximação linear.....	193
4.3.9 - Análise dos resultados.....	196
4.3.10 - Validação dos resultados.....	198
4.4 - Aplicação de um modelo de Taguchi.....	204
4.5 - Conclusões.....	207
4.5.1 - Situação sem covariáveis dependentes do tempo.....	207
4.5.2 - Situação com covariáveis dependentes do tempo.....	208
5 - Procedimentos a adoptar para a aplicação do modelo dos riscos proporcionais.....	213
5.1 - Introdução.....	213
5.2 - Esquema sequencial de procedimentos para aplicação do modelo dos riscos proporcionais.....	213
5.3 - Conclusões.....	218

6 - Conclusões.....	221
6.1 - Conclusões gerais.....	221
6.2 - Interesse na aplicação do modelo.....	224
6.3 - Sugestões para trabalhos futuros.....	225
Bibliografia.....	227
Lista de símbolos	243
Anexo I - Perspectiva histórica da Manutenção.....	249
Anexo II - O "software" utilizado.....	265
Anexo III - Equipamento para medição de vibrações.....	271
Anexo IV - Listagens do programa de regressão para obtenção da relação entre cargas dos moinhos.....	277
Anexo V - Efeito dos pontos de medida no funcionamento do moinho.....	283
Anexo VI - Programa para verificação da independência das variáveis.....	287
Anexo VII - Fórmulas de cálculo das frequências características dos rolamentos.....	289
Anexo VIII - Notas sobre a análise de Fourier.....	291
Anexo IX - Programa para a obtenção das funções de risco e de sobrevivência resultantes da utilização do modelo dos riscos proporcionais com covariáveis dependentes do tempo.....	295
Anexo X - Exemplos de listagens.....	303

Anexo XI - Exemplos de cálculo.....307

Índice de figuras

Figura 1.1 - Tipos de Manutenção.....	5
Figura 1.2 - MTTR/MTBF.....	9
Figura 1.3 - Taxa de avarias vs. taxa de risco.....	12
Figura 1.4 - Curva da banheira.....	14
Figura 2.1 - Esquema representativo da forma de convergência do método de Newton-Raphson.....	68
Figura 2.2 - Representação parcial de uma base de dados utilizada neste trabalho.....	75
Figura 3.1 - Corpo do moinho.....	93
Figura 3.2 - Arranjo das forras do moinho.....	94
Figura 3.3 - Esquema do equipamento com localização dos pontos de medição de vibrações e de temperatura.....	99
Figura 3.4 - Efeito do nível vibratório no funcionamento do moinho.....	116
Figura 3.5 - Efeito do alinhamento no funcionamento do moinho.....	117
Figura 3.6 - Efeito dos pontos de medida no funcionamento do moinho.....	119\Anexo V
Figura 3.7 - Efeito da carga no funcionamento do moinho em situação de não existência de pré-realinhamento.....	121
Figura 3.8 - Efeito da carga no funcionamento do moinho em situação de pré-realinhamento.....	122
Figura 3.9 - Efeito da carga e do enchimento no funcionamento do moinho - 1º ramo.....	124
Figura 3.10 - Efeito da carga e do enchimento no funcionamento do moinho - 2º ramo.....	124
Figura 3.11 - Efeito da carga e do enchimento no funcionamento do moinho para valores fora do padrão directo - 2º ramo.....	125
Figura 3.12 - Efeito do enchimento no funcionamento do moinho.....	127
Figura 3.13 - Resíduos de Cox-Snell.....	129
Figura 3.14 - Árvore de falhas do moinho.....	138
Figura 4.1 - $\ln(-\ln(r(t)))$ para o modo de avaria 4.....	148
Figura 4.2 - Fiabilidade das rectificadoras de eixos por modo de avaria (1 a 4).....	149
Figura 4.3 - Exemplo de relação entre o sinal vibratório e o tempo de ciclo de funcionamento.....	159
Figura 4.4 - Cascata de frequências no ciclo de fabrico.....	164
Figura 4.5 - Espectro de frequências num momento de acabamento.....	165

Figura 4.6 - Rugosidade vs. comprimento segundo a perpendicular à rectificação.....	170
Figura 4.7 - Rugosidade vs. comprimento ao longo da rectificação.....	170
Figura 4.8 - FFT correspondente a 256 pontos referentes a 4.85 s de acabamento.....	172
Figura 4.9 - FFT correspondente a 256 pontos e 0.7 s de acabamento.....	172
Figura 4.10 - $\ln(-\ln(r(t)))$ para vib25 e aproximação exponencial (modo 4).....	185
Figura 4.11 - Fiabilidade para vib25 e aproximação exponencial $\text{rug}(t)$	186
Figura 4.12 - $\ln(-\ln(r(t)))$ para vib25 e aproximação linear (modo de avaria 4).....	188
Figura 4.13 - resultados da corrida de 2L para vib25 e aproximação linear $\text{rug}(t)$	189
Figura 4.14 - $\ln(-\ln(r(t)))$ para vib50 e aproximação exponencial $\text{rug}(t)$ para o modo de avaria 4.....	191
Figura 4.15 - Fiabilidade para vib50 e aproximação exponencial $\text{rug}(t)$	192
Figura 4.16 - $\ln(-\ln(r(t)))$ para vib50 e aproximação linear $\text{rug}(t)$ para o modo de avaria 4.....	204
Figura 4.17 - Fiabilidade para vib50 e aproximação linear $\text{rug}(t)$	205
Figura 4.18 - Comparação entre valores esperados e reais de fiabilidade para vib25.....	203
Figura 4.19 - Comparação entre valores reais e esperados de fiabilidade para vib50.....	204
Figura A3.1 - Constituição de um acelerómetro.....	273
Figura A3.2 - Montagem esquemática de um sistema de recolha de dados com circuito integrado piezoeléctrico.....	275
Figura A3.3 - Montagem de sistema de carga com amplificador utilizado em Renault.....	276

Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Situações particulares paralelas observadas nos moinhos PA e de Miettunen.....	105
Tabela 3.2 - Esquema de utilização de covariáveis mudas para definição dos pontos de medição do nível vibratório.....	108
Tabela 3.3 - a) Distribuição dos casos observados em função da carga e da vibração.....	109
b) Distribuição dos casos observados em função dos pontos de medida e da vibração.....	110
Tabela 3.4 - Resultados do teste à independência dos pares carga-vibração e ponto-vibração.....	110
Tabela 3.5 - Definição da covariável AL.....	111
Tabela 3.6 - Definição da variável caracterizadora do estado da observação.....	112
Tabela 3.7 - Resumo da definição das variáveis.....	113
Tabela 3.8 - Distribuição dos dados segundo as variáveis e respectivas gamas de valores.....	114
Tabela 3.9 - Situações consideradas para caracterizar o efeito da vibração.....	116
Tabela 3.10 - Situações consideradas para caracterizar o alinhamento...	117
Tabela 3.11 - Situações consideradas para a caracterização dos pontos de medida.....	118
Tabela 3.12 - Valores relativos às variáveis estatisticamente significativas.....	119
Tabela 3.13 - Situações representadas para a caracterização da carga...	121
Tabela 3.14 - Situações representadas para a caracterização da carga e do enchimento.....	123
Tabela 3.15 - Situações representadas para a caracterização da carga e do enchimento por comparação com as situações directamente relacionadas.....	125
Tabela 3.16 - Efeito do enchimento no funcionamento do moinho.....	126
Tabela 3.17 - Conversão para vários padrões.....	128
Tabela 3.18 - Conversão para vários padrões incluindo enchimento.....	129
Tabela 4.1 - Eixos - distribuição dos dados segundo variáveis e gamas de valores.....	145
Tabela 4.2 - Distribuição dos números de casos quanto à situação para cada modo de avaria.....	145

Tabela 4.3 - Resultados obtidos de acordo com a máquina rectificadora de eixos.....	146
Tabela 4.4 - Resultados obtidos de acordo com a rugosidade para as rectificadoras de eixos.....	147
Tabela 4.5 - Classes de frequência por tempos de sobrevivência após observação de $.4 < \text{ampl} < .6$	153
Tabela 4.6 - Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados para $\text{ampl} = .5$	153
Tabela 4.7 - Balanceiros - distribuição dos dados segundo tempo e máquina.....	157
Tabela 4.8 - Balanceiros - distribuição dos casos quanto à situação para cada modo de avaria.....	158
Tabela 4.9 - Frequências associadas aos rolamentos dos veios das rectificadoras.....	167
Tabela 4.10 - Frequências dos rolamentos dos veios das mós à velocidade de 1700 rpm.....	168
Tabela 4.11 - Distribuição dos valores de vib25 por classes de frequência.....	175
Tabela 4.12 - Distribuição dos valores de vib50 por classes de frequência.....	175
Tabela 4.13 - Resultados da corrida de 2L para o modo de avaria 1 para vib25 e aproximação exponencial $\text{rug}(t)$	184
Tabela 4.14 - Resultados da corrida de 2L para vib25 e relação exponencial $\text{rug}(t)$ (modo de avaria 2).....	184
Tabela 4.15 - Resultados da corrida de 2L para vib25 e aproximação exponencial $\text{rug}(t)$ (modo de avaria 3).....	184
Tabela 4.16 - Resultados da corrida de 2L Para vib25 e aproximação exponencial $\text{rug}(t)$ (modo de avaria 4).....	184
Tabela 4.17 - Resultados da corrida de 2L para vib25 e relação exponencial $\text{rug}(t)$ (modo de avaria 5).....	185
Tabela 4.18 - Resultados da corrida de 2L para vib25 e relação linear $\text{rug}(t)$ (modo de avaria 1).....	187
Tabela 4.19 - Resultados da corrida de 2L para vib25 e relação linear $\text{rug}(t)$ (modo de avaria 2).....	187
Tabela 4.20 - Resultados da corrida de 2L para vib25 e relação linear $\text{rug}(t)$ (modo de avaria 3).....	187
Tabela 4.21 - Resultados da corrida de 2L para vib25 e relação linear $\text{rug}(t)$ (modo de avaria 4).....	188
Tabela 4.22 - Resultados da corrida de 2L para vib25 e relação linear $\text{rug}(t)$ (modo de avaria 5).....	188

Tabela 4.23 - Resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação exponencial para rug(t) (modo de avaria 1).....	190
Tabela 4.24 - Resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação exponencial para rug(t) (modo de avaria 2).....	190
Tabela 4.25 - Resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação exponencial para rug(t) (modo de avaria 3).....	190
Tabela 4.26 - Resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação exponencial para rug(t) (modo de avaria 4).....	191
Tabela 4.27 - Resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação exponencial para rug(t) (modo de avaria 5).....	191
Tabela 4.28 - Resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação linear para rug(t) (modo de avaria 1).....	193
Tabela 4.29 - resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação linear para rug(t) (modo de avaria 2).....	193
Tabela 4.30 - resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação linear para rug(t) (modo de avaria 3).....	193
Tabela 4.31 - Resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação linear para rug(t) (modo de avaria 4).....	194
Tabela 4.32 - Resultados da corrida de 2L para vib50 e aproximação linear para rug(t) (modo de avaria 5)	194
Tabela 4.33 - Resultados globais.....	197
Tabela 4.34 - Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados para vib25=.02 e aproximação linear rug(t).....	199
Tabela 4.35 - Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados para vib25=.02 e aproximação exponencial rug(t).....	200
Tabela 4.36 - Classes de frequência por tempos de sobrevivência após observação de .01<vib25<.03.....	200
Tabela 4.37 - Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados para vib50=.05 e aproximação linear rug(t).....	200
Tabela 4.38 - Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados para vib50=.05 e aproximação exponencial rug(t).....	201
Tabela 4.39 - Classes de frequência por tempos de sobrevivência após observação de .03<vib50<.07.....	201

1 - Apresentação e Introdução

1.1 - Objectivos e Introdução

A importância crescente com que a Manutenção tem vindo a ser olhada pelos responsáveis pela gestão das empresas tem levado a que, com uma premência cada vez maior, se ponha o problema da quantificação dos parâmetros de decisão em Manutenção.

Com efeito, só um tratamento em termos quantitativos permite avaliar racionalmente os benefícios dos investimentos realizados pelas empresas no seu sector de Manutenção com vista ao aumento da produtividade geral através da optimização do funcionamento da Manutenção.

Por outro lado, tem sido dado como adquirido que o estado de funcionamento dos equipamentos influencia a qualidade dos bens por estes produzidos sem que, até ao momento, tenha sido aplicado qualquer método quantitativo, de forma sistemática, para análise desta relação.

O objectivo deste trabalho é demonstrar que os modelos de fiabilidade podem ser utilizados a partir do conhecimento das relações existentes entre os parâmetros caracterizadores da condição dos equipamentos e os que identificam a qualidade dos produtos produzidos por esses mesmos equipamentos.

Pretende-se, assim, determinar a forma segundo a qual os diferentes parâmetros afectam a fiabilidade dos equipamentos para, a partir dos dados assim obtidos, se poderem definir políticas de revisão dos equipamentos, incluindo ou não a substituição de alguns componentes que os integram, de forma optimizada, conducente ao objectivo final - a redução dos custos de Manutenção sem diminuição da disponibilidade dos equipamentos. Em termos mais abrangentes podemos considerar o caso extremo da substituição do próprio equipamento.

Em suma, far-se-á a determinação da probabilidade de não ocorrência de avarias num sistema reparável, ao fim de um determinado período de tempo, contado a partir de um momento em relação ao qual são conhecidas as respectivas condições de funcionamento e de qualidade dos bens produzidos. Far-se-á também a determinação da relação entre os parâmetros de qualidade dos bens produzidos e os parâmetros de condição dos equipamentos.

Os casos apresentados dirão respeito a equipamentos com características completamente diferentes sendo, num dos casos, ensaiada e testada a relação funcionamento vs. qualidade, e vice-versa, através dos parâmetros característicos para um e outro caso.

Com estes resultados conhecidos podem os gestores determinar de forma mais concreta as políticas de Manutenção para cada um dos equipamentos a que estes métodos sejam aplicados, permitindo realizar a substituição de componentes em intervalos o mais possíveis coincidentes com a vida útil desses componentes e diminuindo, assim, os custos de Manutenção.

Neste primeiro capítulo far-se-á a apresentação do trabalho e dos conceitos gerais nele envolvidos. Proceder-se-á também à apresentação da função Manutenção fazendo uma breve resenha do que tem sido a sua evolução ao longo das últimas décadas (a este propósito, o anexo I apresentará informação mais detalhada).

Assim, o sub-capítulo 1.2 é dedicado à apresentação dos conceitos gerais de Manutenção, Fiabilidade e Avaria e respectiva evolução e necessidade. O sub-capítulo 1.3 apresenta alguns dos modelos matemáticos que mais se aplicam em Manutenção, suas formas de aplicação e situações em que se recomendam, recorrendo, uma vez mais, a alguma da literatura publicada sobre esses temas.

O sub-capítulo 1.4 apresenta um resumo sobre a evolução das teorias relacionadas com a Fiabilidade e a forma de encarar a sua aplicação. Note-se que a necessidade de recurso à Fiabilidade e a forma pela qual essa necessidade surge são apresentadas no sub-capítulo 1.2.

Finalmente, o sub-capítulo 1.5 apresenta o esquema geral do trabalho indicando a forma segundo a qual este se encontra organizado e as ferramentas de cálculo a que se recorre em cada caso.

Refira-se também que no Anexo I se apresenta uma panorâmica sobre a evolução da forma de encarar a Manutenção recorrendo para isso, entre outros meios, a alguns trabalhos de divulgação publicados nesta área.

Este trabalho prévio de apresentação afigura-se-nos necessário porque não existe em Portugal tradição neste domínio, quer a nível técnico quer, sobretudo, a nível científico - note-se que quase não há trabalhos científicos publicados em Portugal sobre este tema até ao momento, tanto quanto é do conhecimento do autor.

1.2 - Conceitos gerais

Como o trabalho produzido nesta área não se encontra, pelo menos no nosso país, reunido de forma sistemática, não existindo, por exemplo, normalização publicada neste domínio, torna-se necessário começar por explicitar algumas definições. É o que se fará neste sub-capítulo, apresentando alguns conceitos relacionados com as noções de Manutenção, Fiabilidade e Avaria, três conceitos básicos para o desenvolvimento deste trabalho.

1.2.1 - Manutenção

O conceito de Manutenção tem evoluído ao longo dos tempos assim como tem evoluído o que se deve entender, dentro da empresa, como função do serviço de Manutenção (ver 1.3).

As normas NF X60-010 e NF X50-501 (1988) apresentam as seguintes definições para os diferentes conceitos a seguir indicados que são também seguidas pela AEM (1990) e por Corder (1976) e que nos parecem adequados, excepção feita ao conceito de Manutenção correctiva:

(i) - Manutenção

Conjunto de acções que permitem manter ou restabelecer um bem num determinado estado ou em condições de assegurar um determinado serviço.

(ii) - Manutenção preventiva

Manutenção efectuada segundo critérios pré-determinados com a intenção de reduzir a probabilidade de avaria de um bem ou a degradação de um serviço prestado.

(iii) - Manutenção (preventiva) sistemática

Manutenção preventiva efectuada segundo um calendário estabelecido em função das unidades de uso.

(iv) - Manutenção (preventiva) condicionada

Manutenção preventiva subordinada a um acontecimento pré-determinado revelador do estado de degradação do bem.

(v) - Manutenção correctiva

Manutenção efectuada após avaria

A respeito desta última definição é importante referir que se têm confundido as designações de Manutenção correctiva e de Manutenção curativa. As normas e publicações já citadas apresentam esquematicamente as diferentes formas de Manutenção não distinguindo entre uma e outra. Pensamos que se deverá designar por

- Manutenção curativa

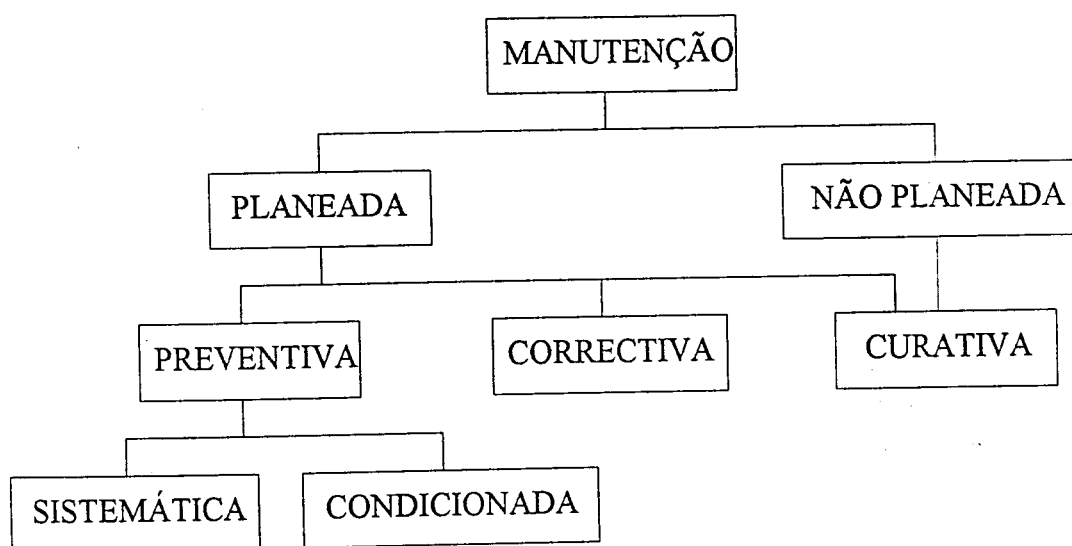
a Manutenção efectuada após avaria

e por

- Manutenção correctiva

operações efectuadas sobre equipamento que comportem alterações à sua constituição e/ou modo de funcionamento tendo em vista uma melhoria da sua capacidade de produção, eficácia, segurança, durabilidade, etc.

À luz destas definições poderiam representar-se esquematicamente os diferentes tipos de Manutenção da seguinte forma:



Tipos de Manutenção
Figura 1.1

No sub-capítulo 1.3 serão desenvolvidos detalhadamente os conceitos mais importantes relacionados com a Manutenção e alguns dos seus aspectos.

1.2.2 - Fiabilidade

Quando se adquire um bem, qualquer que ele seja a sua finalidade, e este é colocado em funcionamento espera-se que este corresponda às expectativas de quem o adquiriu. Apesar disso, é sempre possível que, em algum momento da sua vida útil, i. e., o período de tempo em que o bem está em condições económicas de desempenhar a sua função, ocorra uma falha no seu funcionamento.

É por isso necessário um conceito que relacione o estado de funcionamento com o tempo. É esse o papel da Fiabilidade.

Define-se Fiabilidade como a

capacidade de um bem desempenhar a sua função específica em condições definidas e por um período de tempo determinado.

Esta definição é seguida por AEM (1990) e AFNOR (1988).

Ireson (1988) considera o período de cumprimento da função de forma mais lata, colocando, para além do tempo, a possibilidade de contagem em termos de ciclos de funcionamento ou acontecimentos.

A Fiabilidade pode expressar-se através da probabilidade de que o bem funcione correctamente nas condições e no período de tempo referidos.

Repare-se que a noção de tempo poderá ser substituída por outro tipo de unidade de contagem (horas, quilómetros, etc.).

É necessário definir com clareza o que se entende por funcionamento correcto. Tal definição faz-se, por oposição, através da definição do funcionamento não correcto, recorrendo ao conceito de falha ou avaria (ver 1.2.3).

Matematicamente expressar-se-á a função fiabilidade através da probabilidade do bem não falhar num dado período - a probabilidade é função do tempo e representa-se por $R(t)$. A probabilidade de falha nesse período é expressa pela função $F(t)$, com:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (1.1)$$

Se tivermos a função densidade de falhas, $f(t)$, com:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1.2)$$

teremos

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \quad (1.3)$$

ou

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx \quad (1.4)$$

e

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(x)dx \quad (1.5)$$

1.2.3 - Avaria

Por falha ou avaria, termo que se passará a utilizar, entende-se, segundo AEM (1990) e AFNOR (1988), a

cessação da capacidade de um bem para realizar a sua função específica.

Esta definição leva, por arrastamento, a precisar o conceito de função específica. Com efeito, não se deverá entender que o bem ou equipamento estará avariado quando, de todo, o seu funcionamento é interrompido mas quando não é possível que realize a sua função de acordo com as condições específicas segundo as quais se espera que funcione. Assim, o equipamento poderá estar a funcionar em condições consideradas deficientes ou insuficientes o que levará a uma intervenção dos serviços de

Manutenção e, como tal, deverá ser considerado que houve uma avaria do equipamento.

Pelas razões apontadas, a norma NF X 06-501 apresenta um conjunto de definições relativas à classificação das avarias de acordo com a rapidez de manifestação, com o grau de importância, com ambos os anteriores e ainda com as causas e as consequências da avaria.

Surgem assim as definições de avaria progressiva, súbita (rapidez), parcial, completa (grau), catalítica, por degradação (rapidez e grau), má utilização, primária, secundária (causas), crítica, maior, menor (consequências), etc.

De entre estas saliente-se a definição de :

(i) avaria catalítica

Avaria simultaneamente repentina e completa

(ii) avaria por degradação

Avaria simultaneamente progressiva e parcial

(iii) avaria primária/secundária

Avaria de um dispositivo cuja causa não está/está na avaria de um outro dispositivo

(iv) avaria crítica

Avaria que impede o desempenho da função e faz correr graves riscos de danos pessoais ou desgastes muito importantes ao material

A definição dos tipos de avarias está também relacionada com o estudo da fiabilidade pois, de acordo com o tipo de avarias que se considere ou do que se considere como avaria, o valor de fiabilidade encontrado será um ou outro, pois até os valores de partida serão diferentes.

1.2.4 - Taxa de avarias

A taxa de avarias é uma função muito utilizada em Fiabilidade e expressa a probabilidade de uma avaria ocorrer num dado momento ou, mais

correctamente, entre t e $t+dt$. Define-se como a variação do número esperado de avarias ocorrido com o tempo decorrido e será aqui designada por $\lambda(t)$. Seja $N(t)$ a função que representa o número de avarias acumuladas pelo sistema ou conjunto de sistemas ao longo do tempo, ou seja, o número de avarias sofridas pelo sistema entre 0 e t . Então:

$$\lambda(t) = \frac{dE[N(t)]}{dt} \quad (1.6)$$

Com $E[N(t)]$ a representar a esperança matemática de $N(t)$.

Assim, a taxa de avarias aparece-nos como um parâmetro que respeita a sistemas reparáveis aplicando-se a qualquer ocorrência repetitiva observada, por unidade de tempo, num sistema reparável ou num conjunto de sistemas reparáveis.

Como estimador da taxa de avarias pode-se utilizar

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} \quad (1.7)$$

O tempo médio de funcionamento entre duas avarias num dado t , MTBF(t), também designado por MTBF instantâneo, representa o inverso da taxa de avarias.

Para que não se confunda MTBF com a diferença cronológica de tempos entre avarias, a figura 1.2 esquematiza uma situação em que entre a ocorrência de avaria $n-1$ e a ocorrência n existe um tempo de reparação e um tempo de funcionamento. Presume-se que o equipamento não esteve parado por falta de utilização.

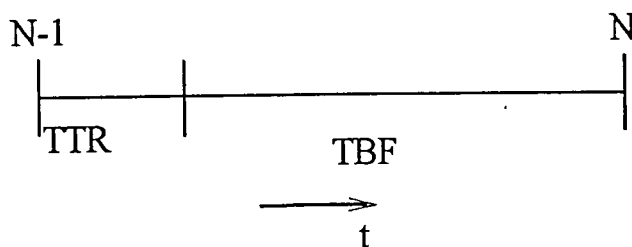


Figura 1.2

MTTF representa o tempo até à ocorrência de falha em sistemas não mantidos/reparáveis e pode-se introduzir também MTTF para significar o tempo que medeia entre a entrada em funcionamento e a ocorrência da primeira avaria em sistemas reparáveis. Será:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (1.8)$$

MTTF será representado da mesma forma se tivermos em atenção que a escala de tempos é contada desde o começo do funcionamento até à ocorrência da primeira falha.

Convém referir que podemos considerar sistemas reparáveis e sistemas não reparáveis e sistemas mantidos e sistemas não mantidos. Um sistema não reparável é sempre um sistema não mantido e um sistema mantido é sempre um sistema reparável. Não existem sistemas não reparáveis mantidos. Poderão existir sistemas reparáveis não mantidos mas, do ponto de vista da fiabilidade, não existem vantagens nisso.

1.2.5 - Taxa de risco

A taxa de risco ou função de risco representa a probabilidade de um item ou componente não reparável vir a avariar no intervalo de tempo $[t, t+dt]$, sabendo que no instante t ele se encontra em funcionamento. Trata-se de uma probabilidade condicional de falha por unidade de tempo no instante $t+dt$ visto que é dado que funciona no instante t .

É importante referir que autores como Jardine (1979) e Lyonnet (1989) apresentam deste modo aquilo a que designam por taxa de avarias instantânea. Leitão (1989) apresenta a dedução da seguinte expressão definidora da taxa de risco:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.9)$$

Pode-se definir também a função de risco acumulada, $H(t)$, como:

$$H(t) = \int_0^t h(x)dx \quad (1.10)$$

Aparecem grandes discrepâncias na literatura e, por vezes, grandes confusões no tratamento dos conceitos de taxa de avarias e taxa de risco. É importante referir que o conceito de taxa de avaria não se pode aplicar a sistemas/componentes não reparáveis considerados isoladamente. Contudo, ambos os conceitos se poderão aplicar a sistemas reparáveis. cremos que a melhor distinção que se poderá fazer entre os dois conceitos, para estes sistemas, tem a ver com a escala de tempos. Assim, a taxa de avarias tem como base o tempo já passado desde a entrada em funcionamento até ao momento presente; a taxa de risco toma como base o tempo passado desde a última avaria até ao momento presente.

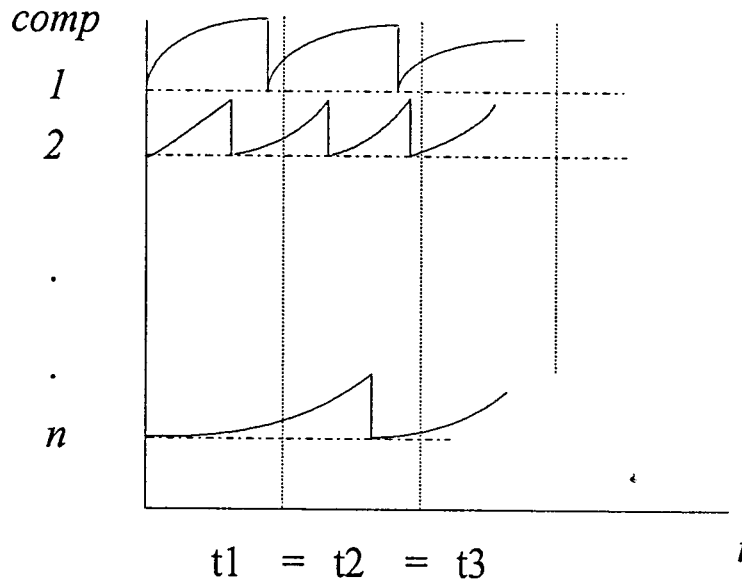
$h(t)$ é bastante mais sensível às avarias que $R(t)$. Quando $R(t)$ ainda é praticamente igual a 1 pode-se recorrer à curva $h(t)$ para concluir do que acontece a $R(t)$ quando t aumenta. Como

$$h(t) = \frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = - \frac{dR(t)}{R(t)} \cdot \frac{1}{dt} \quad (1.11)$$

$h(t)$ pode ser encarada como a diminuição relativa de $R(t)$ por unidade de tempo. É possível ainda escrever

$$h(t) = - \frac{d [\ln R(t)]}{dt} \quad (1.12)$$

A figura 1.3 ilustra a relação entre a taxa de avarias de um sistema composto por vários componentes e a taxa de risco de cada componente. A taxa de avarias tende para um valor constante à medida que o tempo de funcionamento do sistema aumenta, ou seja, e recorrendo à figura, a tendência é para que em intervalos de tempo iguais ($t_1, t_2, \dots$) ocorram iguais números de avarias do sistema motivadas por falhas dos seus componentes. Para cada componente, a taxa de risco, representada, respectivamente, por cada uma das curvas desenhadas, vai aumentando desde a entrada em serviço até ao momento de falha.



Taxa de avarias vs. taxa de risco

Figura 1.3

1.2.6 - Disponibilidade

A função disponibilidade, $A(t)$, é, segundo AEM (1990), a probabilidade de um item ou equipamento se encontrar operacional no instante t , sabendo-se que no instante $t=0$ ele se encontrava operacional.

O aumento de disponibilidade dos equipamentos e componentes é um dos principais objectivos de todos os modelos de Manutenção que qualquer gestor pretenda aplicar. Pretende-se otimizar a relação custo do modelo/período de funcionamento.

A percentagem de tempo total em que o equipamento se encontra disponível é a disponibilidade estacionária, A . Segundo Corder (1976) e AEM (1990)

$$A = \frac{UT}{UT + DT} \quad (1.13)$$

com

UT (up-time) - período de tempo em que o equipamento está em condições de ser utilizado

DT (down-time) - período de tempo em que o equipamento não está em condições de ser utilizado

Também se pode ter:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1.14)$$

Na expressão anterior, ao tempo médio de reparação, MTTR, poderá ainda juntar-se o tempo médio de espera. Os parâmetros que figuram nas expressões 1.13 e 1.14 devem ser entendidos como funções do tempo.

Finalmente, note-se que o conceito de disponibilidade não implica necessariamente que o equipamento esteja em funcionamento mas, tão só, que esteja em condições de funcionar.

Note-se também que $MTBF + MTTR = UT + DT$. Se tiver lugar uma reparação, se todos os componentes defeituosos forem reparados ou substituídos e se o equipamento for imediatamente intervencionado após ocorrência de avaria num tempo curto, poderá considerar-se $MTTR = 0$.

Teremos portanto

$$UT = MTBF$$

$$DT = MTTR$$

1.3 - Modelos Matemáticos em Manutenção

Como se pode ver pelo Anexo I, a evolução tecnológica tem feito com que a Manutenção assuma uma importância cada vez maior na gestão da empresa moderna. A importância da fiabilidade e da disponibilidade das máquinas não cessa de aumentar fazendo com que, cada vez mais, a gestão e a organização da Manutenção tenham que assentar em modelos matemáticos.

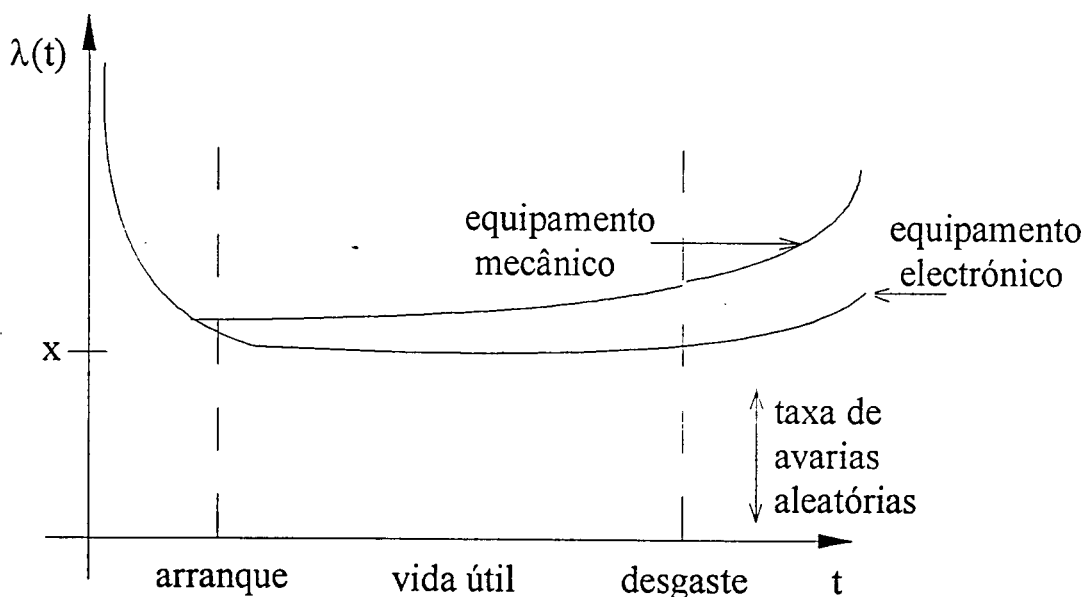
Sendo os modelos de fiabilidade o objectivo básico deste trabalho, é-lhes destinado desenvolvimento específico no que respeita, respectivamente, à

sua evolução (1.4) e ao enquadramento do modelo dos riscos proporcionais (2.2).

Neste sub-capítulo traça-se uma panorâmica sobre os métodos matemáticos aplicados à gestão e à organização da Manutenção sem prejuízo de alguns desses aspectos poderem vir a ser tratados mais concretamente como consequência dos resultados obtidos nos casos estudados. Ir-se-ão abordar também alguns aspectos relacionados com a aplicação de modelos matemáticos ao comportamento dos materiais durante a sua utilização ao longo da vida útil dos equipamentos.

1.3.1 - Modelos referentes ao comportamento do material

Os modelos referentes ao comportamento do material derivam da necessidade de avaliar os modos de degradação dos equipamentos ao longo da sua vida útil. Essa degradação vai influenciar a evolução da taxa de avarias ao longo do tempo que é representada pela conhecida curva da banheira:



Curva da banheira

Figura 1.4

que retrata os três períodos distintos da vida do equipamento, juventude (arranque), maturidade (funcionamento pleno) e velhice (degradação acelerada).

A curva da banheira é a junção de três curvas distintas, uma para cada período, se quisermos utilizar uma das distribuições padrão para a taxa de avarias em cada um dos períodos da vida do equipamento. É, contudo, possível chegar a uma curva de forma semelhante através de dados experimentais desde que haja pontos suficientes para traçar a curva.

Actualmente tem que se ter em conta que esta curva poderá assumir outras formas. Uma das mais correntes relaciona-se com o facto de muitos equipamentos chegarem às mãos dos utilizadores já testados e rodados de forma a eliminar a parte de "mortalidade" inicial. A curva fica, assim, apenas com duas zonas.

É importante esclarecer que a curva da banheira, embora possa ser apresentada com a mesma forma para sistemas reparáveis e para sistemas não reparáveis, não representa o mesmo nos dois casos. Assim, nos sistemas reparáveis ela representa efectivamente a taxa de avarias em função do tempo de serviço acumulado mas nos sistemas não reparáveis representará a variação da taxa de risco com a idade. Em termos gerais, pode-se considerar uma curva da banheira para sistemas reparáveis e outra para sistemas não reparáveis.

Ascher e Feingold (1984) referem a compatibilidade entre a curva da banheira e o teorema de Drenick prolongando-a até à situação de taxa de avarias constante. Apesar da profundidade com que este assunto é tratado no trabalho referido, não se indica claramente a forma segundo a qual esse processo tem lugar, ou seja, através do amortecimento de curvas sucessivas com forma semelhante, nem como poderá ser provocado. No limite, e em termos matemáticos só no limite, a taxa de avarias será constante. Para efeitos práticos poder-se-á considerar taxa constante logo a partir de um número restrito de amortecimentos (até 2 ou 3, por exemplo).

Os processos anteriores são provocados através dos chamados "revampings" das instalações industriais ou de grandes revisões e beneficiações. É o que acontece, por exemplo, com os autocarros ao fim de 12 anos de serviço. Quando a taxa de avarias passa a ser quase constante, tais procedimentos deixam de ser rentáveis. Existindo interesse, podem, a partir daí, os bens ser convertidos para fins culturais ou colecção.

A passagem ao limite implica uma ocorrência aleatória de avarias a taxa constante, ou seja, apareceriam como resultado de um processo de Poisson homogéneo.

A aplicação de modelos matemáticos em Manutenção, no que respeita ao comportamento dos materiais, baseia-se essencialmente nas diferentes leis de fiabilidade. Cada uma dessas leis origina uma distribuição que teremos que comparar com os resultados observados.

No caso de ajustamento de modelos paramétricos (ver 2.2) a sistemas reparáveis, a taxa de avarias aparece-nos claramente definida como função do tempo de serviço (ou igual a constante, como caso particular). Um exemplo conhecido desta situação é um dos modelos aplicados a processos pontuais não homogéneos de Poisson (ver 1.4.3), designado por modelo de Crow, e em que a taxa de avarias é estimada por

$$\hat{\lambda}(t) = \hat{\phi} \hat{\phi} t^{\hat{\phi}-1} \quad (1.15)$$

e em que

$$\hat{\phi} = \frac{m}{\sum_{i=1}^{m-1} \ln \frac{T_m}{T_i}}, \text{ parâmetro de forma}$$

e

$$\hat{\phi} = \frac{m}{T_m^{\hat{\phi}}}, \text{ parâmetro de escala}$$

com T_m a representar o tempo ao fim do qual ocorre a avaria nº m. Note-se que com $0 < \hat{\phi} < 1$ se tem um modelo de crescimento de fiabilidade. Perera (1990) aplica este modelo a um sistema processador de dados.

É o comportamento dos materiais que vai determinar também o cálculo do MTBF e é através deste cálculo que se podem planificar as intervenções de manutenção preventiva e, acima de tudo, determinar se, para um dado equipamento, se deverá optar por uma política preventiva ou curativa.

Lyonnet (1989), por exemplo, apresenta uma forma de calcular, conhecendo a lei de vida de um componente e os custos da sua substituição, programada ou não, se se deve ou não aplicar uma política de manutenção preventiva a um dado equipamento, recomendando o recurso a AFNOR (1988) para consulta dos ábacos necessários, construídos para o caso da distribuição de Weibull. Esse processo, após se ter verificado a validade da política de manutenção preventiva, fornece o tempo de substituição preventiva óptimo. Phillips (1990) apresenta uma forma paramétrica e outra não paramétrica de calcular o número médio de avarias de um sistema reparável.

1.3.2 - Modelos de organização

Os modelos de organização são modelos que pretendem retratar em termos quantitativos aspectos como:

- classificação de intervenções
- análise de avarias
- previsão de tempos de espera para começo de intervenção
- dimensionamento de equipas
- disponibilidade dos equipamentos

Em Portugal estes modelos não têm sido aplicados de forma sistemática embora se venha a assistir, nos últimos anos, a um esforço por parte de algumas empresas no sentido da utilização pontual de algumas destas técnicas, nomeadamente no que respeita a classificação de intervenções e a análise de avarias.

Seria interessante, contudo, que se viessem a incorporar estes modelos nos sistemas informáticos integrados de gestão da Manutenção. Esperamos que, com este trabalho, se possa contribuir também para esse objectivo através do alerta aqui lançado e dos programas compatíveis já existentes.

a) Classificação de intervenções

A classificação de intervenções é realizada através do recurso à análise ABC ou de Pareto. Através desta análise consegue-se obter uma classificação das avarias relativamente aos custos de intervenção e de

perdas por danos e paragens de modo a definir prioridades de intervenção da Manutenção.

Lyonnet (1989) apresenta, para definição das zonas ABC, os seguintes intervalos:

- A
Zona das prioridades
20 % das avarias
80 % dos custos
- B
30 % das avarias
15 % dos custos
- C
50 % das avarias
5 % dos custos

Esta análise permite aumentar a fiabilidade das máquinas, através da consciencialização por parte dos gestores sobre quais as máquinas e as intervenções incluídas na categoria A, para as quais se poderão adoptar políticas preventivas mais rigorosas com uma gestão de peças de reserva mais consistente com a realidade.

b) Análise de avarias

Apresentou-se em 1.2.3. a definição de avaria e as suas implicações. Contudo, os serviços de Manutenção terão que atender a que, para que a avaria não volte a produzir-se, é necessário, para além de a suprimir, procurar a primeira causa que está na origem da avaria.

Lyonnet (1989) apresenta o método Maxer de desempanagem racional e um conjunto de relações matemáticas de procura das causas de avaria.

Lyonnet (op. cit.) apresenta também a análise de variância como técnica complementar ao estudo das interdependências para permitir medir as interacções de vários factores em simultâneo optimizando, ao mesmo tempo, o número de observações a realizar. O autor apresenta-a como uma

técnica adequada à investigação sobre as avarias, nomeadamente no domínio da manutenção dos sistemas produtivos, estudando as interacções entre parâmetros como a regulação das máquinas e as cadências de produção.

O efeito de interacção é estudado por experiências repetitivas devendo haver aditividade dos factores testados. Para testar a validade das interacções estudadas comparam-se as variâncias dos efeitos calculados com a distribuição de Fisher. As variâncias são calculadas dividindo os efeitos de cada factor ou das intervenções pelo número de graus de liberdade.

c) Previsão de tempos de espera

Um dos problemas mais importantes para o gestor de um serviço de Manutenção é o da capacidade de intervenção a partir do momento em que a respectiva necessidade é detectada. Com efeito, o gestor deverá jogar com os factores que consegue controlar de modo a minimizar os custos directos e indirectos da reparação tendo em conta que nos custos indirectos se encontram incluídas as perdas de produção. Entre esses factores contam-se a possibilidade de alterar as OT's (ordens de trabalho) na lista de espera do planeamento, de melhorar a produtividade das equipas e a composição destas, podendo, neste último caso, isso vir a reflectir-se no número de equipas.

Kelly (1977) apresenta um modelo matemático de previsão de tempos de espera baseado nas distribuições, em termos de densidade de probabilidades dos intervalos de chegada dos trabalhos e dos tempos de reparação e no número de equipas.

Define o factor de utilização como o quociente entre as taxas médias de chegada de trabalhos e de execução dos mesmos e expressa

- probabilidade de n trabalhos em espera
- número médio de trabalhos em espera
- tempo médio de intervenção

como funções do factor de utilização e das taxas referidas. No caso de haver várias equipas o factor de utilização difere do anterior porque é

calculado dividindo também pelo número de equipas. Este problema é tratado de modo muito semelhante em Jardine (1979).

d) Dimensionamento de equipas

Jardine (1979) apresenta um modelo que relaciona o custo de intervenção total por unidade de tempo com o número de elementos constituintes da respectiva equipa de intervenção.

O modelo é constituído tendo em atenção que o número de trabalhos pendentes no início de um intervalo de tempo, e Jardine considera esse intervalo como sendo de 1 semana, estarão todos concluídos no final do intervalo. O modelo complica-se na situação de os trabalhos poderem ser transpostos de uma semana para outra.

Contudo, parece-nos possível adaptar o modelo se tivermos em atenção que para a obtenção, com probabilidade elevada, do número de trabalhos que a capacidade do serviço permite satisfazer numa semana basta recorrer a um planeamento informatizado da Manutenção, já suficientemente testado, ou ao número médio de trabalhos em lista de espera e ao tempo médio de espera, calculados segundo o modelo anterior, proposto por Kelly. Neste último caso, a previsão seria obtida através da divisão do número médio de trabalhos em espera pelo tempo médio de espera.

Jardine (1979) apresenta uma expressão para o cálculo do custo total por unidade de tempo em função do número de elementos das equipas e, é de referir, que Carruthers *et al*, em Jardine (1973), apresentam um caso prático de dimensionamento de equipas aplicado à manutenção da frota de uma instalação mineira de carvão.

e) Disponibilidade dos equipamentos

A técnica mais conhecida para estudar e modelar a disponibilidade dos equipamentos é o modelo conhecido por cadeias de Markov.

Este modelo pressupõe que cada estado seja independente dos anteriores, excepção feita ao imediatamente anterior. À medida que o número de

intervalos de tempo aumenta, a probabilidade de o sistema permanecer num determinado estado vai tender para um valor limite.

Se os sistemas forem contínuos no tempo (consideramo-los discretos no espaço) para que as cadeias de Markov se possam aplicar é necessário que as taxas de avarias e reparações sejam constantes o que leva a que as suas distribuições sejam exponenciais.

1.3.3 - Modelos de gestão

Os modelos matemáticos de gestão que mais se têm aplicado à função Manutenção nas empresas dizem respeito a

- gestão de peças de reserva
- renovação dos equipamentos

a) Gestão de peças de reserva

As peças de reserva, gerais ou específicas, e os consumíveis representam os "stocks" a aprovisionar com vista ao exercício da função Manutenção. A gestão de "stocks" de peças de reserva reveste-se, porém de alguma especificidade por comparação com a situação geral. Não sendo esse aspecto aqui tratado, refira-se que podem ser utilizados modelos referentes a:

- revisão periódica de encomenda
(periodicidade e "stock" máximo)
- revisão contínua de encomenda
(quantidade a encomendar e ponto de encomenda)
- reaprovisionamento único
(quantidade a encomendar e ponto de encomenda)

Entre parêntesis referem-se os parâmetros em que cada tipo de modelos se baseia.

b) Renovação dos equipamentos

Jardine (ops. cit.) faz referência a um conjunto de modelos passíveis de basear a decisão da substituição de um determinado equipamento industrial de forma a otimizar os custos de operação.

Esses modelos variam de acordo com o tipo de equipamentos e as situações em que operam.

Pode-se assim distinguir entre:

- modelos de substituição para equipamentos cujo custo de operação aumenta com o tempo de utilização;

Incluem-se neste caso os equipamentos mecânicos cujos custos de manutenção aumentam com o uso.

- modelos de substituição preventiva para equipamentos sujeitos a avaria;

Incluem-se neste caso os equipamentos/componentes eléctricos e electrónicos cujos custos de manutenção não aumentam com o tempo de utilização mas que nem por isso deixam de estar sujeitos a falha.

- modelos para substituição em grupo;

Trata-se de um caso particular de um modelo aplicável a equipamentos sujeitos a avaria quando se prevê que a falha do primeiro equipamento de um conjunto precede, num pequeno intervalo de tempo, as falhas sucessivas de uma parte significativa dos equipamentos constituintes do conjunto.

- modelos de substituição para equipamentos que actuam em paralelo numa situação de reserva;

- modelos de substituição que consideram as actualizações tecnológicas;

Os equipamentos não são substituídos por outros exactamente iguais mas por equipamentos equivalentes que incorporaram as inovações tecnológicas desenvolvidas durante o tempo de funcionamento do equipamento a substituir e que foram aplicáveis ao tipo de equipamento em causa.

Legát (1993) apresenta um método para substituição óptima de equipamentos em termos de manutenção preventiva baseando-se na idade

dos equipamentos e na manutenção condicionada. Nos exemplos apresentados refere apenas casos em que os equipamentos obedecem à distribuição de Weibull mas os resultados obtidos são bastante precisos.

Schouten (1993) apresenta um modelo de optimização de manutenção para um conjunto de máquinas idênticas sujeitas a avarias aleatórias. Este modelo tem a particularidade de basear o controlo de um sistema a partir da consideração de quatro estados possíveis para cada componente em vez de optar somente pelo número de componentes avariados ou no tempo de serviço. Considera ainda duas políticas possíveis para a substituição completa do sistema, ambas dependentes de um certo número de componentes em *estado duvidoso (estado 1)*. Quando se segue a primeira daquelas políticas, substitui-se o sistema à primeira vez que, após se ter atingido o tal número de componentes em estado duvidoso, um é considerado *mau (estado 2)* ou *falha (estado 3)*. Na segunda, a substituição tem lugar desde que haja um componente *mau* ou em falha e se atinja o número de *duvidosos* que serve de referência. O modelo deriva então expressões para o tempo de substituição e para o custo por unidade de tempo. A validação é feita por simulação (seria interessante mostrar a aplicação do modelo a um caso concreto, validando-o dessa forma).

Schouten (1995) apresenta várias formas de modelação de decisões de Manutenção em que volta a referir de forma minuciosa o modelo anterior.

Mais recentes são os modelos para substituição de componentes de sistemas reparáveis. Aven (1995) apresenta várias situações de substituição óptima de componentes num sistema monótono (sistema no qual uma melhoria no funcionamento de um qualquer componente não piora o funcionamento do sistema).

1.4 - A evolução das teorias de Fiabilidade

Neste sub-capítulo traça-se uma panorâmica sobre o aparecimento e desenvolvimento das teorias de Fiabilidade e suas aplicações, referindo-se também a forma como a Fiabilidade recorre aos métodos estatísticos. Faz-se ainda a aproximação da Fiabilidade à Qualidade quer através das analogias inerentes à utilização de ferramentas comuns quer no que concerne à inter-relação por via de parâmetros característicos.

1.4.1 - Estatística e Fiabilidade

Os métodos matemáticos aplicados ao estudo da Fiabilidade dos equipamentos recorrem a ferramentas de tratamento estatístico dos dados disponíveis pelo que existe uma relação profunda entre a Fiabilidade e a Estatística, ou seja, não é possível empreender qualquer estudo fiabilístico sem um suporte estatístico prévio. Isto vem do facto de o conhecimento ou, melhor, a previsão de falha de um produto ou equipamento durante um determinado intervalo de tempo só poder ser encarada em termos de probabilidade.

Um estudo de Fiabilidade necessita, por parte de quem o pretender empreender, de:

- conhecimento do suporte estatístico prévio e formas de utilização;
- conhecimento profundo dos equipamentos em estudo no que respeita a, principalmente, modos de avaria;
- definição, para cada caso, do que deve ser entendido como avaria.

De modo geral, os autores que se debruçam sobre a Fiabilidade procedem à apresentação da base estatística e probabilística que suporta o seu estudo. É assim que Jardine (1979), Ireson (1988), Lyonnet (1989), O'Connor (1992) e Villemeur (1992) procedem à apresentação dos conceitos e das leis fundamentais para o cálculo de probabilidades para, seguidamente, apresentarem as distribuições que mais se aplicam em Manutenção e Fiabilidade para a realização de estudos de sobrevivência e uma tipificação dos casos em que se aplica preferencialmente cada uma delas (Weibull, exponencial negativa, normal, hiperexponencial, etc.). Morão (1967) apresenta um trabalho de investigação aplicada directamente à indústria têxtil ilustrando de forma concreta a forma como estas ferramentas se podem aplicar a trabalhos deste tipo.

1.4.2 - A Fiabilidade e a concepção de equipamentos e sistemas

Apresentou-se em 1.2.2. a definição de Fiabilidade. Contudo, a possibilidade de contribuir para a melhoria da Fiabilidade coloca-se a três níveis:

- componentes
- equipamentos
- instalações

A nível dos componentes a questão põe-se, antes de mais, ao nível do projecto. Interessará apenas prever, em termos da sua sobrevivência, os factores de que depende a ocorrência mais ou menos prematura da falha.

A nível dos equipamentos as acções a empreender devem ser encaradas

- durante a fase de selecção dos diferentes componentes em separado e do equipamento como um todo
- durante o período de funcionamento através das acções de Manutenção e da respectiva política de Manutenção

O último aspecto é tratado ao longo de todo este trabalho. O primeiro é abordado por Bloch (1988) ao tratar dos processos de aumentar a fiabilidade de diversos equipamentos mecânicos como bombas centrífugas, compressores, turbinas de vapor, etc. através de acções como:

- selecção de fornecedores
- selecção de empanques
- determinação exaustiva das condições de funcionamento recorrendo às leis da Termodinâmica e da Mecânica dos Fluidos
- preparação para o arranque de instalações
- política de peças de reserva como condicionante para a escolha do fornecedor

Este autor aborda também a Fiabilidade numa perspectiva de pós-arranque do equipamento focando aspectos relacionados com a informatização da Manutenção e o controlo de condição seguindo linhas semelhantes às que, de forma mais evoluída, foram desenvolvidas por outros autores em trabalhos mais recentes já citados anteriormente. Bloch tem, todavia, a preocupação de apresentar processos de monitorização para as características dos equipamentos específicos que aborda no seu trabalho.

Jardine (1979) trata o aspecto da melhoria da Fiabilidade das instalações através da interdependência do equipamento inserido num conjunto.

Nessa perspectiva, trata a associação de equipamento em série e em paralelo e as combinações de equipamentos associados em série e em paralelo.

Por exemplo, num processo produtivo de equipamento em série considera a colocação de equipamentos em paralelo nas fases críticas do processo para criar situações de redundância.

Apresenta formulação matemática para todas estas situações com vista ao cálculo da Fiabilidade de cada conjunto.

Trata também o problema da chamada redundância activa, i. e., os casos em que os sistemas trabalham com todos os equipamentos em paralelo, quando tal é possível, mas nos quais uma falha de um dos equipamentos não implica a quebra de funcionamento de todo o sistema. O autor vai ainda mais longe ao apresentar a optimização da instalação de redundâncias, das diferentes formas acima referidas, em função dos custos dos equipamentos.

1.4.3 - Evolução dos métodos de Fiabilidade

Segundo Leitão (1989), o campo da Fiabilidade como ciência tem uma origem relativamente recente, tendo sido o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos e sistemas a provocar o desenvolvimento dos estudos de Fiabilidade nos últimos 25 anos. Este autor refere também que a necessidade de estudar a Fiabilidade se prende com a necessidade de compreensão e de controlo dos riscos com que nos deparamos todos os dias face ao desenvolvimento tecnológico.

Coloca fora de dúvida que, e embora alguns autores defendam que as modernas teorias de Fiabilidade têm as suas origens nos finais dos anos 40, os trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento da Fiabilidade começaram a aparecer a partir do início dos anos 60.

Villemeur (1992) indica que a utilização de conceitos como o MTBF e a taxa de avarias foram desenvolvidos durante os anos 50 tendo sido também por essa época que se começaram a desenvolver esforços no sentido de prevenir e compreender os erros humanos que contribuem para a avaria dos equipamentos.

Na Europa, o Centre d'Études des Télécommunications (CNET) cria, em 1961, o seu Centro de Fiabilidade CNET.

A necessidade de desenvolver métodos estatísticos para o estudo da Fiabilidade aparece-nos no início dos anos 70 não tendo, desde essa época, deixado de se aprofundar essa vertente com a busca dos meios mais adequados para cada tipo de equipamento e/ou sistema.

Os anos 60 vêem alargar-se o campo de aplicação da Fiabilidade. Surgem as primeiras análises detalhadas de avarias em componentes e dos seus efeitos no desempenho dos sistemas em que estão integrados e na segurança de pessoas e bens envolventes. Estas técnicas desenvolveram-se rapidamente nas indústrias aeronáuticas e aeroespaciais.

Surge também nessa época o método da árvore de falhas e o método FMEA (failure mode and effect analysis). Na literatura francesa este acrónimo aparece referido como AMDEC.

Antes dessa época, meados de 60, a grande maioria das análises de Fiabilidade restringia-se ao estudo de distribuições de avaria com o recurso à distribuição exponencial.

É o aparecimento da distribuição de Weibull que vem mostrar que a distribuição exponencial não deveria ser aplicada de forma tão generalizada como até aí tinha sucedido.

Datam também dos anos 60 os primeiros livros dedicados à divulgação destes problemas, embora as primeiras revistas tivessem surgido na década anterior; a adopção de um conjunto de normas de fiabilidade, a serem adoptadas em todas as fases de desenvolvimento de um produto, pelo Departamento de Defesa dos EUA, é ainda desta época (1966 a 1969).

Surgem apenas nos anos 70 as primeiras técnicas não paramétricas desempenhando, neste campo, um papel fundamental o trabalho de Cox

(1972) em que se faz a análise dos tempos de avaria censurados. Neste trabalho a função de risco é considerada função das variáveis explícitas mas também de coeficientes de regressão desconhecidos multiplicados por uma função do tempo arbitrária e desconhecida.

Este trabalho apresenta já algumas generalizações do processo introduzido e começa por basear o seu estudo nas chamadas tabelas de vida.

Mas o facto essencial a reter é o universo de aplicações que parece basear estes trabalhos. Com efeito, estes estudos aparecem virados para aplicações no campo médico sendo apenas, depois disso, que aparecem as generalizações para a área da engenharia, nomeadamente para a engenharia de Manutenção. Já no final dos anos 70 Aitkin (1979) apresenta um estudo de ajustamento de algumas distribuições vulgarmente aplicadas em estudos de manutenção realizado através do recurso ao "software" GLIM mas, mais uma vez, os exemplos que apresenta como suporte ao seu estudo são retirados do campo médico.

Actualmente é comum o aparecimento de trabalhos relatando a aplicação das teorias de Fiabilidade e das diferentes distribuições aplicadas a casos concretos nas mais diferentes empresas. É o caso, por exemplo, do trabalho de Seixas (1991) que apresenta uma aplicação da distribuição log-normal aos caminhos de ferro procedendo a uma análise da manutibilidade dos equipamentos. O objectivo é a identificação dos pontos críticos na manutenção de modo a auxiliar na tomada de decisão para corrigir as deficiências encontradas nos métodos de gestão utilizados.

É curioso que este autor também refere o desenvolvimento tecnológico como o grande responsável pelo desenvolvimento das teorias de Fiabilidade.

O mais significativo avanço na forma de encarar a aplicação da Fiabilidade à Manutenção tem a ver com o facto de, nos últimos anos, já terem surgido trabalhos a basear a gestão da Manutenção na fiabilidade dos equipamentos. É o caso do trabalho de Anderson (1990) que apresenta as diferentes técnicas fiabilísticas como ferramentas para aplicação ao planeamento do sistema de Manutenção.

Este autor apresenta o que designa por "Reliability Centered Maintenance" (RCM) cujas actividades estão viradas para o planeamento da Manutenção

e para a prevenção de avarias. RCM representa um processo de decisão lógica destinado a estabelecer programas de Manutenção, nomeadamente preventiva, mais eficientes. O autor apresenta uma aplicação das técnicas descritas à segurança de um voo de avião como forma de facilitar a análise de um processo de RCM. É de referir que as técnicas apresentadas levam em conta os defeitos e as possibilidades de avaria que podem ter sido introduzidos ou causados durante a produção, armazenagem e, obviamente, a operação e a manutenção dos equipamentos e componentes. Procedem também a uma normalização dos defeitos potencialmente detectáveis e à construção das árvores de falhas. Arslan (1993) apresenta uma versão modificada desta técnica que, através de diagnóstico estatístico, pode ser aplicada com melhores resultados a equipamentos mecânicos. Worledge (1993) apresenta ainda um balanço dos resultados obtidos com a aplicação de RCM a centrais nucleares desde 1990.

Paralelamente, é de referir, num outro campo de aplicação da Fiabilidade, os estudos relacionados com os riscos das centrais nucleares e das indústrias petroquímicas.

Ebrahimi (1993) analisa o papel da teoria da informação na análise fiabilística pois os métodos baseados nesta teoria só agora se começam a desenvolver. Este autor analisa a perda de informação resultante dos mecanismos de censura estatística colocando a questão sobre quais os casos que fornecem mais informação sobre parâmetros como a vida média ou a taxa de avarias, os que falham até t ou os que não falham até ao fim da experiência. Quando os tempos de vida seguem uma distribuição exponencial, os que falham são mais significativos em termos de vida média mas os que sobrevivem são mais significativos em termos de taxa de avarias.

Um modelo de fiabilidade é determinado por um dado número de condições sobre as falhas dos elementos constituintes de um sistema. Quando tomadas em conjunto, aquelas condições formam o modelo no qual se vão basear os cálculos fiabilísticos.

Em termos gerais podem-se considerar dois tipos fundamentais de modelos de Fiabilidade, os determinísticos e os estatísticos. Klaasen (1989) apresenta, como exemplos dos primeiros, o modelo de Arrhenius e o modelo electrolítico. Os modelos estatísticos podem ser paramétricos ou não paramétricos, consoante pretendam ou não, respectivamente, ajustar

uma distribuição aos tempos de avaria/falha para uma população homogénea, e estocásticos, modelos pontuais que analisam repetidas avarias no mesmo equipamento.

Os modelos paramétricos são os mais eficientes mas necessitam, para que possam ser aplicados, que sejam exhaustivamente verificadas as condições básicas de funcionamento e que sejam interpretados correctamente todos os factores que possam ter influenciado os dados em análise. São exemplos as distribuições

- exponencial
- Weibull
- gamma
- lognormal

suficientemente analisadas em muitos autores já citados (Jardine, Lyonnet, Klaasen, etc.); constituem também exemplos os modelos aplicáveis a sistemas:

- catastrófico
- tensão-extensão
- Markov

analisados por Klaasen (1989).

Quando não é possível proceder ao ajustamento de uma dada distribuição aos dados em análise terá que se recorrer a métodos não paramétricos que, se por um lado são menos eficientes, permitem, por outro, trabalhar com um menor conjunto de condições iniciais. Leitão (1989b) apresenta uma panorâmica sobre os principais tipos de aplicação destes modelos e sobre os trabalhos a esse respeito publicados.

Os modelos estocásticos são, essencialmente, modelos pontuais quando aplicados a sistemas reparáveis. Os principais referem-se a:

- processos homogéneos de Poisson (HPP)
- processos não homogéneos de Poisson (NHPP)
- processos de Poisson ramificados (BPP)
- processos de renovação (RP)
- processos de renovação sobreimpostos (SRP)

Todos são tratados por Ascher e Feingold(1984).

É comum assumir-se, quando se utilizam aqueles modelos, que a avaria ocorre num instante preciso no tempo. Os processos referidos são por isso

considerados pontuais. Contudo, isto pode não ser exactamente verdade devendo, por isso, definir-se muito bem o que se entende, para cada caso em estudo, por avaria. É necessário também assumir que os tempos de reparação são curtos quando comparados com os tempos entre avarias, de modo a considerar só os tempos de operação (ver 1.2.4 e 1.2.6).

Quando se entende que um processo pontual não retrata a situação que se pretende estudar, por se considerar que a avaria é fruto de um processo de degradação sucessiva das condições de funcionamento, há que recorrer a modelos caracterizados por processos não pontuais.

Actualmente começam a ser aplicados à Manutenção e à Fiabilidade os chamados modelos funcionais. Modarres (1993) apresenta a modelação funcional de sistemas complexos, frizando e ilustrando especificamente a sua aplicação à Manutenção. Apresenta-se em 2.2 a definição de sistema funcional.

Groenendijk (1995) considera, contudo, que não tem havido grande progresso na investigação fiabilística nos últimos anos o que, segundo o autor nem sequer está de acordo com o esforço dispendido. A explicação estará no facto de que a maior parte da investigação gira em torno de modelos matemáticos virados para configurações especiais que, embora alarguem o conhecimento a nível da engenharia de fiabilidade, não são facilmente aplicáveis a situações industriais práticas. Segundo este autor dever-se-ia investir mais no desenvolvimento de técnicas para resolução de problemas reais.

1.4.4 - Bancos de dados de Fiabilidade

À medida que as técnicas de organização e gestão da Manutenção vão evoluindo, nomeadamente com o recurso à informática, vai havendo um conjunto cada vez maior de dados sobre o histórico dos equipamentos nas empresas. Esse conjunto de dados tem a ver, entre nós e na generalidade das empresas que já vêm realizando essa recolha de informação, com as intervenções realizadas, tipos de tarefas e fases constituintes, mão de obra utilizada, ferramentas, materiais, etc.

Esses dados podem ser analisados com vista à construção de bancos de dados de Fiabilidade que nos indiquem as avarias sofridas por um equipamento, suas causas, periodicidades, etc.

A necessidade da existência de bancos de dados de Fiabilidade obtidos a partir de experiências no campo advem da necessidade de comparar com os valores teóricos as situações práticas nos diferentes campos de actividade a fim de se poder continuar a realização de previsões cada vez mais seguras sobre os estados futuros de diferentes tipos de equipamentos desde a instalação ao termo da sua vida útil e, até, sobre a própria duração dessa vida útil.

Contudo, tem havido, por motivos comerciais e técnicos, alguma dificuldade na divulgação desses bancos de dados e no seu acesso, o que tem trazido grandes entraves ao desenvolvimento de diversos estudos nesta área.. Este aspecto é também referido por Leitão (1989).

Cannon (1991) procede a um estudo sobre a recolha, validação, armazenagem, manuseamento e utilização de bancos de dados de Fiabilidade.

Apresenta os princípios que devem presidir à recolha e organização destes dados, os processos de análise e a construção de sistemas de informação para diversas situações, nomeadamente unidades industriais.

AFNOR (1988) apresenta, na norma X60-502, Fiabilidade em exploração e pós-venda, as formas pelas quais se deve proceder à recolha, tratamento e análise de dados de Fiabilidade ao longo do tempo de vida do equipamento em função dos diferentes tipos de produtos e/ou equipamentos.

Consideram-se os bancos de dados de Fiabilidade como uma ferramenta fundamental para a concepção de futuros equipamentos e para a definição das condições óptimas de exploração dos que já se encontram em serviço em função dos desempenhos e dos custos.

Lyonnet (1989) divide os bancos de dados de Fiabilidade em bancos de dados internos e bancos de dados externos. Os bancos de dados internos são os que respeitam aos equipamentos da própria empresa ou a equipamentos análogos em serviço noutras empresas; são obtidos através

do histórico dos equipamentos da própria empresa ou, se possível, recorrendo a informações prestadas por empresas que possuam equipamentos semelhantes. Nos casos em que tal faz sentido incluem-se aqui os dados referentes a informações dos clientes sobre o comportamento dos produtos vendidos pela empresa. Lyonnet refere como dados desta espécie os "TBF" ou o MTBF. Do histórico dos equipamentos deverão constar, para além dos "TBF", o tipo de avaria e os órgãos avariados que justificaram cada intervenção da manutenção. Os bancos de dados externos dizem respeito a tabelas referentes, de forma geral, a determinados componentes electrónicos ou mecânicos mais comuns. São editadas por diversos organismos e indicam, entre outros, a designação do componente/material a que respeitam, o MTBF e a taxa de avarias média. Contudo, a utilização destas tabelas deve ser encarada com alguns cuidados porque a sua construção baseia-se em condições padrão de funcionamento que nem sempre se verificam. Há determinados factores que, em condições específicas, servem como amplificadores de condições de risco.

Em relação aos bancos de dados internos, note-se que a partir de uma quantidade suficiente de valores de TBF é possível estabelecer leis de Fiabilidade para os diversos equipamentos ou órgãos com todas as vantagens daí decorrentes no que respeita ao estabelecimento de políticas de manutenção preventiva e ao modelo a adoptar (ver 1.3).

Groenendijk (1995) considera o aparecimento de bases de dados genéricos e de larga utilização na indústria como um dos mais relevantes desenvolvimentos dos últimos anos no campo das ferramentas postas ao dispor da engenharia de fiabilidade. Refere especialmente a base de dados OREDA (Offshore Reliability Database).

1.4.5 - Fiabilidade e Qualidade

As noções de Fiabilidade e Qualidade são indissociáveis. Com efeito, sem qualidade durante a concepção e fabrico dos produtos não se poria sequer a questão de saber se eram fiáveis. Por isso, e segundo AFNOR (1988), na norma X06-501, a Fiabilidade aparece como um prolongamento da qualidade no tempo.

O período de tempo durante o qual a noção de Fiabilidade prolonga a noção de qualidade é o tempo de vida útil dos bens utilizados.

Segundo a norma AFNOR X50-109, a Fiabilidade aparece como uma componente da qualidade juntamente com:

- características e desempenhos
- manutenibilidade
- disponibilidade
- durabilidade
- segurança de utilização
- características não poluentes
- custo global de posse

Em face do exposto, têm sido vários os autores que, ao longo das duas últimas décadas, têm trabalhado os dois conceitos em conjunto ou com as mesmas ferramentas. Inclusivamente, têm sido feitas várias aproximações à qualidade na função Manutenção. Smith (1969) apresenta um estudo conjunto da Fiabilidade e da Qualidade, trabalhando-as com as mesmas ferramentas estatísticas e o mesmo conjunto de distribuições e abordando aspectos como o controlo de qualidade e as auditorias de qualidade mas também os problemas durante a produção e a fiabilidade dos equipamentos produtivos e dos produtos obtidos no período de utilização. Este autor começa, aliás, por apresentar as formas de medição dos desvios em relação à distribuição normal.

Krishnaiah (1988) e Lyonnet (1991) apresentam a Qualidade como uma forma de garantir a fiabilidade dos bens produzidos visto que a não fiabilidade tem custos elevados:

- devolução do produto
- perda do mercado com a consequente degradação da imagem de marca
- manutenção mais cara

A Qualidade tem que ser garantida durante o fabrico para que o produto seja de utilização segura ao longo do seu tempo de vida útil.

Nesta óptica, Lyonnet apresenta os diferentes processos de garantir a qualidade dos produtos fabricados, sendo a qualidade a forma de garantir a fiabilidade. É curioso comparar as técnicas descritas nesta obra com as

apresentadas em Lyonnet (1989) numa perspectiva unicamente de Manutenção.

Lyonnet apresenta as ferramentas AMDEC (análise dos modos de avaria e estudo de criticidades) desenvolvidas a partir da análise funcional e seguindo os mesmos princípios básicos do trabalho virado para a manutenção.

Craveiro (1991b) apresenta a importância que a função Manutenção tem na qualidade dos produtos fabricados não deixando de referir a influência daí decorrente nos custos de Produção. Contudo, aproveitando esta abordagem, passa também para o problema da qualidade na própria função Manutenção. Ou seja, a função Manutenção só conseguirá os seus objectivos de minimização dos seus próprios custos, de produção de produtos não conformes e de tempos de indisponibilidade dos equipamentos produtivos, se ela própria for um serviço de qualidade possuindo "o mínimo de atributos para não ser rejeitada pelo cliente".

Essa qualidade passará pela garantia de bom funcionamento dos equipamentos após intervenção da Manutenção, pelo cumprimento dos prazos de intervenção estipulados, por intervenções a custos competitivos e por uma capacidade de satisfação global das necessidades do cliente. O autor propõe a quantificação de determinados parâmetros definidores das actividades produtivas e de manutenção como forma de análise dos desempenhos da função Manutenção. Assim, apresenta as flutuações de produção e a cadência produtiva, como factores produtivos a analisar, e uma classificação das causas de paragem e respectiva pesquisa, como forma de visualizar os problemas existentes em termos de manutenção.

Note-se, contudo, que a classificação de avarias e respectiva discriminação e análise podem servir para determinar as causas das perdas produtivas mas não servem, por si só, para determinar as causas das perdas de qualidade dos produtos fabricados. Esta perda de qualidade, quando se fica a dever a funcionamento não adequado dos equipamentos, está relacionada com a necessidade de intervenção sobre os mesmos que, entretanto, são mantidos em funcionamento para além do aceitável.

A terminar, uma nota para o trabalho de Zhao (1992) que trata o problema da fiabilidade na armazenagem. É um caso típico de interacção entre a Fiabilidade e a Qualidade pois o que está em causa é a Qualidade, no

tempo, do produto armazenado. A partir de certo momento, o nível de qualidade baixa a um ponto tal que torna o produto não utilizável.

1.4.6 - Componentes e sistemas reparáveis

Debruçando-se este trabalho sobre a aplicação de modelos de fiabilidade a equipamentos mecânicos considerados como objectos de manutenção, pretende esta secção dar uma panorâmica sobre o que tem sido a aplicação de modelos fiabilísticos a sistemas reparáveis.

Ascher e Feingold (1984), para além de descreverem os modelos aplicáveis a estes sistemas, comparam-nos entre si e analisam as respectivas condições de aplicação. Apresentam também modelos dedicados ao crescimento da fiabilidade desses sistemas, dividindo-os em modelos pontuais e modelos baseados em equações diferenciais.

Contudo, este campo de aplicação tem sido dos que mais têm sido estudados em Fiabilidade, quer a nível teórico quer a nível prático. Assim, Chatfield (1973) apresenta um conjunto de técnicas para análise de dependências sequenciais em séries de observações que poderão levar, cada uma delas, a um dado número de resultados possíveis mas igual para todas. O autor recorre ao modelo das cadeias de Markov mas não leva em conta os intervalos de tempo entre as diferentes observações pelo que os processos que estuda terão que ser homogéneos no tempo o que nem sempre se passa. Os resultados não devem ser estendidos a populações não homogéneas sem um certo cuidado mas parecem ser de mais fácil generalização no campo da engenharia do que no campo do comportamento animal, que parece ser o domínio de estudo do autor. Um modelo mais geral, porque já aplicável a populações não homogéneas, é apresentado por Morgan (1976).

Bunday (1978) apresenta um modelo desenvolvido para um estudo de investigação operacional de um processo altamente automatizado na indústria têxtil. O objectivo é o aumento da eficiência do processo e esse aumento é conseguido à custa da diminuição dos tempos de reparação e da detecção atempada e automática de avarias.

Trabalhos mais recentes têm vindo a ser publicados nesta área. São exemplo disso os trabalhos de Klaasen (1989) e Ansell (1989). Klaasen

divide os sistemas reparáveis em dois grupos, consoante sejam ou não alvo de manutenção curativa. Trata os aspectos relacionados com o controlo de condição e, nas situações curativas, a existência ou não de redundância.

Ansell apresenta três exemplos de conjuntos de dados recolhidos para fins de análise fiabilística utilizando modelos estocásticos aplicáveis a sistemas reparáveis. O autor dedica particular atenção à escolha do modelo adequado a cada caso e à análise dos dados recolhidos, nomeadamente no que respeita ao ajustamento do modelo escolhido aos dados. Utiliza o modelo dos riscos proporcionais para identificar os factores que mais afectam o tempo de vida dos equipamentos.

Mais recentemente, Aubrey (1993) apresenta as propriedades da inferência estatística em processos exponenciais dando especial atenção aos testes de ajustamentos. Trata o problema do ajustamento de dados referentes a vários sistemas reparáveis e analisa um estudo de simulação que utilizou para verificar os testes de ajustamento aplicados a vários processos exponenciais de Poisson, dando especial atenção ao caso não homogéneo. Conclui que pode utilizar um teste de ajustamento que, quando analisa vários sistemas idênticos, pode utilizar uma combinação de dados dos vários sistemas desde que os β 's não difiram substancialmente.

Parmigiani (1993) apresenta um estudo sobre formas de resolver alguns problemas que se colocam quando se pretende adoptar uma política de inspecção em equipamentos reparáveis sujeitos a avarias aleatórias que só podem ser detectadas - supõe-se que o maior risco da sua ocorrência - mediante inspecções onerosas. O autor começa por assumir que o sistema está monitorizado e trata os problemas da redundância, da substituição e da incerteza da ocorrência das avarias.

Eid *et al* (1992) apresentam um modelo para modos de avaria comuns em sistemas complexos. Utilizam o método FMECA para gerar bases de dados automáticas para sistemas inteligentes e isso permite-lhes também otimizar o circuito de informação.

Hickling (1992) usa os diagramas de causas para proceder a análises de fiabilidade em sistemas sequenciais e apresenta um algoritmo baseado num processo iterativo que analisa quantitativamente esses diagramas através de um processo semelhante aos diagramas de estado dos modelos de Markov. O autor apresenta o modelo quantificado baseado nas taxas de

avarias e não especifica a situação quando estão em causa componentes não reparáveis. Becker (1992) introduz o conceito de descontinuidade para processos de Markov para a construção de modelos complexos utilizados em sistemas com inspecções em datas fixas.

1.4.7 - Técnicas de regressão

Nem sempre é possível proceder à aplicação de processos pontuais devido à impossibilidade de verificar as condições que tiveram que ser assumidas à partida. Por outro lado, os dados disponíveis não fornecem um número de avarias suficientemente vasto para permitir a aplicação dessas técnicas ou, então, mesmo que o permitam, só dificilmente essa aplicação se concretiza devido à diluição de casos no tempo e à sua pouca homogeneização.

Quando se procede a análises de fiabilidade, é comum encontrar sistemas semelhantes que funcionam em condições diferentes ou que possuem condições de base diferentes em termos de engenharia. Quer umas quer outras são, na maioria dos casos, suficientemente conhecidas. O que se desconhece são os seus efeitos no desempenho dos sistemas em causa, seja a nível de Fiabilidade ou de qualidade da produção.

Para tornear estas questões, várias têm sido, ao longo do tempo, as aproximações tentadas. As mais conhecidas são as que se limitam a considerar os diferentes sistemas como iguais e as que dividem o conjunto total de dados em subconjuntos formados de acordo com as maiores diferenças entre eles.

Se, a primeira aproximação não parece razoável, a segunda elimina, à partida, quaisquer relações existentes entre dados incorporados em subconjuntos diferentes impedindo a retirada de ilacções que poderiam ser importantes para o conjunto. Faz também com que se trabalhe, em cada subconjunto, com grande número de dados censurados.

Considera-se, assim, a utilização de modelos de regressão para os dados referentes a tempos de avaria capazes de fornecer a base comum aos dados de todos os sistemas considerados e de permitir o tratamento de todos os factores e variáveis relacionados com aqueles tempos.

Usher (1993) apresenta um exemplo de aplicação tratando o caso em que são conhecidos os tempos de avaria mas em que se desconhece qual o componente que provocou essa avaria do sistema. É necessário, portanto, estimar também a fiabilidade dos componentes cujas falhas não são conhecidas no momento exacto. O autor usa um método iterativo para determinação dos estimadores necessários partindo do pressuposto de que os componentes em causa terão uma distribuição de avarias tipo exponencial ou de Weibull. O processo poderá aplicar-se a muitas indústrias, nomeadamente a automóvel, mas requer a existência de bancos de dados suficientemente grandes e actualizados. Fica por determinar como o nível de desconhecimento para cada componente afecta a qualidade dos estimadores encontrados.

Os modelos de regressão aplicados a tempos de falha baseiam-se essencialmente na distribuição exponencial e na distribuição de Weibull. Kalbfleish (1980) mostra a forma como ambas podem ser generalizadas dando origem a duas famílias de modelos de regressão. A diferença entre os dois tipos de modelos reside na forma segundo a qual se considera a influência das variáveis que representam os efeitos de todos os factores que influenciam os tempos de falha ou avaria, as variáveis explicativas. Numa das famílias, o efeito daquelas variáveis, ou covariáveis, actua multiplicativamente sobre o tempo de avaria - são os chamados modelos de tempo de falha acelerada. Na outra, os efeitos dessas covariáveis fazem-se sentir multiplicativamente sobre a taxa de risco - são os modelos de riscos proporcionais.

1.5 - Esquema do trabalho

Este trabalho pretende mostrar que é possível prever a fiabilidade dos equipamentos industriais a partir do conhecimento dos valores das principais variáveis relacionadas com esses equipamentos, tomadas em simultâneo. Mostra-se que se pode recorrer, para aquele fim, à utilização de variáveis definidoras da condição dos equipamentos e/ou à utilização de variáveis definidoras da qualidade dos bens produzidos por esses mesmos equipamentos para que se proceda, em cada momento, a partir do conhecimento do valor da variável mais cómoda ou de mais fácil acesso.

É, portanto, necessário proceder a uma caracterização das diferentes variáveis envolvidas. Essa caracterização pode comportar alguma

complexidade como se verificará, mais adiante no quarto capítulo, com a variável de condição aí utilizada, o nível vibratório. O trabalho pretende ilustrar também todos os passos dados com vista à obtenção de uma caracterização eficaz e consentânea com o processo e o equipamento em causa.

Para que se torne possível a utilização de qualquer um dos tipos de variáveis acima explicitados, é necessário encontrar processos de as relacionar entre si. Por isso, outro dos objectivos deste trabalho é a obtenção de uma relação entre as variáveis de condição e de qualidade para que se possa, então, recorrer à mais vantajosa. Mostra-se, então, também como as variáveis que especificam o estado de funcionamento dos equipamentos se podem relacionar com as variáveis que especificam a qualidade dos produtos obtidos.

Para que se tomem as variáveis em simultâneo, o modelo de Fiabilidade escolhido foi o modelo dos riscos proporcionais que surge aqui utilizado com covariáveis variáveis no tempo numa situação industrial, o que também constitui outro dos objectivos do trabalho. Porque se trata de uma situação pioneira, descreve-se a forma como foi obtida a relação entre a variável e o tempo.

Atendendo à grande quantidade de trabalho desenvolvido de forma pioneira, apresenta-se no final uma metodologia de sistematização do processo de forma a que o mesmo possa vir a ser utilizado no futuro em condições diversas.

No capítulo dois procede-se à apresentação e à descrição do modelo fiabilístico de base utilizado e aos condicionalismos que envolvem a sua utilização.

No capítulo três apresenta-se o primeiro caso em estudo, um exemplo mais simples e de preparação para o caso que é estudado de forma completa. Faz-se uma análise dos factores que influenciam o estado de funcionamento do equipamento, apresentando este e as formas pelas quais se procedeu à medição das variáveis consideradas. Como resultados apresentam-se as formas como esses factores influenciam a função de sobrevivência e as acções que, em função de um determinado resultado, devem ser tomadas.

No capítulo quatro apresenta-se o segundo caso em estudo, seguindo um figurino semelhante ao anterior mas entrando em linha de conta com a possibilidade de se considerarem covariáveis variáveis no tempo e com a inclusão de uma relação entre as variáveis de qualidade do produto e as variáveis de condição do equipamento. O tratamento é, na realidade, feito segundo duas formas diferentes porque se considerou, em separado, as rectificadoras de eixos, onde não se consideraram covariáveis variáveis no tempo, e as rectificadoras de balanceiros, onde a rugosidade aparece tratada como covariável dependente do tempo.

No quinto capítulo apresenta-se uma metodologia para aplicação do modelo dos riscos proporcionais a equipamentos industriais, numa perspectiva do utilizador desses mesmos equipamentos.

No último capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 - O Modelo dos riscos proporcionais

2.1 - Introdução

Este capítulo apresenta o modelo dos riscos proporcionais e os principais conceitos com ele relacionados.

Começa-se por enquadrar aquele modelo no conjunto dos modelos de Fiabilidade mais utilizados actualmente para, de seguida, se proceder a uma revisão bibliográfica dividida em duas partes distintas, a primeira referente a outros modelos, levada a efeito através de alguns trabalhos considerados mais ilustrativos do que se tem feito neste campo nos últimos anos na área da engenharia, e a segunda respeitante ao modelo dos riscos proporcionais propriamente dito, também em engenharia.

Em seguida procede-se à apresentação e descrição geral do modelo, dando especial atenção aos dados de partida e aos resultados que o modelo proporciona.

Apresentado o tipo de resultados que se obtêm, indica-se a forma de os obter, dando especial atenção ao conceito de verosimilhança e ao método numérico iterativo de resolução de equações algébricas de Newton-Raphson.

Descrito o modelo, passa-se à apresentação de algumas das suas particularidades e potencialidades com a utilização de covariáveis dependentes do tempo, devido à importância que assume neste trabalho, a ser tratada em separado.

Finalmente, tecem-se considerações de ordem geral sobre o modelo e apresenta-se um balanço de utilizações.

O modelo dos riscos proporcionais foi apresentado pelo Professor Cox em 1972 através de um artigo submetido à "Royal Statistical Society". Esta técnica foi, nos anos iniciais, quase só aplicada ao campo da medicina,

aliás um dos que mais o tem utilizado ao longo dos anos pelo que, ainda hoje, é nessa área que se podem encontrar a maior parte dos exemplos ilustrativos da aplicação desta técnica, conforme refere Leitão (1989).

Aquando da apresentação daquele seu trabalho pioneiro, já Cox (1972) referia as potencialidades da sua aplicação ao domínio da fiabilidade e da análise de sobrevivência em engenharia. Contudo, é de referir que permanecem neste último domínio algumas dificuldades básicas na aplicação do modelo:

- a facilidade em aplicar aos dados fiabilísticos existentes para uma determinada aplicação distribuições tipo Weibull ou exponencial consoante o problema em análise, aliado ao facto de estas distribuições estarem muito mais divulgadas junto dos engenheiros ligados à prática da fiabilidade;
- a não adequação dos dados existentes à aplicação do modelo.

No trabalho em referência, Cox faz a análise de tempos de avaria censurados assumindo que, para cada caso, estão disponíveis valores para uma ou mais das chamadas covariáveis consideradas. A função de risco, introduzida como uma taxa de avaria função da idade, uma taxa de avaria "condicionada" ao momento em que se inicia a contagem do tempo para cada caso, é considerada função das covariáveis e dos coeficientes de regressão multiplicados por uma função do tempo arbitrária e também desconhecida. Esta função e os coeficientes de regressão terão que ser calculados para que se possa fechar o modelo.

As tabelas de vida já eram, à época, uma das técnicas estatísticas mais utilizadas, sendo também uma das mais antigas. Contudo, Cox considerou que estava ainda insuficientemente analisada a teoria que lhes servia de base. Por isso, considerando que um artigo publicado por Kaplan e Meyer em 1958, oferecia novos resultados para análise dando, ao mesmo tempo, uma retrospectiva do que até então se tinha avançado nesse domínio, estende os resultados de Kaplan e Meyer de modo a que se possa trabalhar com as covariáveis na análise de tabelas de vida ou de sobrevivência.

Cox deu uma grande atenção à possibilidade de o seu modelo poder incorporar observações censuradas mas o mais importante é o facto de o

modelo não necessitar de qualquer distribuição estatística específica, conforme se irá ver ao longo deste capítulo.

2.2 - Características de outros modelos de Fiabilidade

Este trabalho centra-se na aplicação do modelo dos riscos proporcionais a equipamentos mecânicos ou de funcionamento mecânico no que respeita à função base desempenhada. Contudo, diversas outras opções se podem colocar pelo que se torna relevante fazer uma breve resenha dos modelos que actualmente podem ser aplicados a equipamentos de funcionamento mecânico com vista ao estabelecimento de previsões sobre a sua condição futura.

Antes de mais, é importante referir que não se procederá à descrição de qualquer método mas, apenas, ao levantamento das suas características.

Por outro lado, as classificações dos modelos de fiabilidade podem ser levadas a efeito de várias formas, havendo a tendência, que começa a ser contrariada, para tratar apenas os modelos estatísticos. Por isso, há que ter em atenção que, nas situações em que tal se revele possível, se poderá recorrer à utilização de modelos determinísticos, por oposição aos modelos estatísticos, e aos modelos funcionais.

Uma questão importante é a que respeita à definição de modelo de Fiabilidade porque aparecem confundidos na literatura vários conceitos tomando-se como modelo, por vezes, apenas as distribuições de variáveis.

Um modelo de Fiabilidade é determinado por um número de premissas sobre a avaria dos componentes do sistema em estudo. Tomadas em conjunto estas premissas formam o modelo em que o cálculo da fiabilidade se baseia.

2.2.1 - Modelos determinísticos

Modelos determinísticos são modelos baseados nas leis de degradação física dos componentes ou sistemas sujeitos a falha. É importante conhecer o que inicia o processo, que condições ambientais o podem acelerar ou potenciam o seu desenvolvimento e como conduzem à avaria de um dado

componente; também há que controlar as formas pelas quais se consegue parar ou, normalmente, diminuir a taxa de progressão dos efeitos associados. Com base no conhecimento do processo de deterioração dominante e no da respectiva taxa de degradação, podem-se fazer previsões sobre a vida útil do componente ou sistema em causa.

Se, no que diz respeito a certos componentes, se poderá, com uma margem de erro relativamente pequena, aplicar um modelo deste tipo, já no que respeita a equipamentos ou sistemas mais complexos tal se afigura bastante difícil. Com efeito, nesses casos não é possível definir qual o processo de deterioração determinante (apenas um) e, por outro lado, estes modelos não permitem o tratamento simultâneo de vários processos em conjunto.

Não foi, assim, possível encarar a hipótese de aplicação de qualquer modelo deste tipo aos casos estudados neste trabalho, pelo que se recorreu à utilização de um modelo estatístico.

2.2.2 - Modelos estatísticos de fiabilidade

Modelos estatísticos de fiabilidade são modelos que recorrem ao conhecimento de situações ocorridas no passado com um dado componente, sistema ou equipamento ou com entidades semelhantes para inferir sobre a condição futura dessa entidade, seja através do ajustamento de uma distribuição de tipo previamente definido ou através do cálculo de uma função própria caracterizadora da fiabilidade prevista, embora não explicitada algebricamente. No primeiro caso trata-se de modelos paramétricos e, no segundo caso, de modelos não paramétricos.

Existem, contudo, outras situações caracterizadoras de modelos estatísticos; entre as principais citem-se o tipo de entidade em causa, passível de caracterização quanto à função (electrónica, mecânica, informática, etc.) e quanto às possibilidades de reparação (reparável ou não reparável). Estas situações ajudam a escolher, por exemplo, uma dada classe de funções para ajuste de um modelo paramétrico.

Podem também estabelecer-se modelos que se baseiam no tipo de falha, como o modelo catastrófico, que supõe um só modo de avaria, ou no tipo de variáveis, como os de Markov, baseados no estado do equipamento e

no tempo de observação contado a partir do último zero; as variáveis podem ser discretas ou contínuas e a cada uma delas pode ajustar-se a distribuição que for mais conveniente. Nem um nem outro discriminam os diferentes modos de avaria nem permitem relacionar as mesmas com outras variáveis.

O ajustamento de uma dada distribuição a um componente deverá pressupor que o funcionamento desse componente não é afectado pela falha de outro qualquer componente do sistema o que, nos casos em estudo, não é certamente a situação pois, por exemplo, no caso das rectificadoras tratadas no capítulo 4, o funcionamento da ferramenta é influenciado por todos os outros componentes referidos, excepção feita, talvez, às portas.

Deve ser ainda referido que muitos autores, como, por exemplo, Ascher e Feingold (1984), tratam os modelos a partir da forma de consideração do processo de avaria, ou seja, os que analisam repetidas falhas na mesma entidade ou, por vezes, em entidades iguais. Entre estes modelos são muito referidos os modelos de Poisson, homogéneos ou não, talvez devido à facilidade de tratamento, nos processos homogéneos, ou à possibilidade de avaliar a evolução desse mesmo processo partindo da hipótese de que o mesmo pode ser melhorado (é o caso dos processos não homogéneos).

Os mesmos autores consideram ainda a divisão entre processos pontuais, em que é considerado apenas o momento de falha, entendida esta por não funcionamento por oposição à situação de funcionamento, e processos não pontuais. Nestes últimos, a falha é considerada como o resultado de um processo de degradação.

2.2.3 - Modelos funcionais

Os modelos funcionais opõem-se aos modelos baseados em ocorrências. Com efeito, os modelos de ocorrências, todos os que acima foram referidos, centram a sua análise nas diversas ocorrências que influenciam o funcionamento dos sistemas.

Os modelos funcionais, pelo contrário, preocupam-se com a forma segundo a qual componentes, sistemas e equipas de trabalho funcionam em conjunto de modo a desempenhar determinadas funções operacionais

críticas. Estas funções podem ser de índole directamente produtivo ou de manutenção (incluindo a segurança).

Os modelos funcionais têm sido pouco utilizados na análise do funcionamento de sistemas complexos mas nos dois últimos anos tem-se assistido a um grande esforço de desenvolvimento destes sistemas.

2.3 - Súmula bibliográfica de aplicações fiabilísticas

Nesta secção analisam-se alguns trabalhos considerados ilustrativos dos modelos e das aplicações fiabilísticas tratados nos últimos anos. As referências são apresentadas por ordem cronológica em cada sub-secção, fiabilidade em geral e riscos proporcionais em particular.

2.3.1 - Aplicações sem utilização dos riscos proporcionais

Qamber (1990) apresenta uma aplicação de um modelo de equações diferenciais para a resolução das quais indica vários métodos fazendo, contudo, uma opção justificada por apenas um deles. A curiosidade deste trabalho reside precisamente na não consideração de processos pontuais para caracterizar as situações que se pretendem estudar. O autor apresenta ainda vários modelos de equações diferenciais e os estados que os caracterizam. A complexidade dos modelos aconselhará alguma prudência na sua aplicação. Situações que vão para além do arranque de equipamentos industriais ou do estudo do seu comportamento logo após uma grande reparação não terão vantagens em ser modeladas desta forma. Mesmo nestas situações, será de bom senso que a sua aplicação se limite a equipamentos críticos e cuja aquisição corresponda a um elevado custo.

Kvam (1993) estima pelo processo da máxima verosimilhança uma distribuição para os tempos de vida de componentes que falharam num dado sistema em conjugação com o tempo de falha do sistema. Apresenta uma situação paramétrica e uma situação não paramétrica.

Xie (1993) apresenta vários modelos para estimativa da fiabilidade de "software". Todos estes modelos são modelos de fiabilidade crescente, começando o autor por ajustar o modelo de fiabilidade crescente referido em 1.3.1.

Baker (1993b) apresenta um algoritmo para cálculo da função de renovação. A função de renovação é interpretada como o número esperado de avarias por unidade de tempo quando um dado componente num conjunto é imediatamente substituído após a falha. O estimador é calculado através de um pequeno programa em linguagem C e tem a particularidade de ser um estimador não paramétrico o que facilita o trabalho inicial. A verificação foi feita por recurso a simulação de amostras aleatórias.

Recentemente tem vindo a assistir-se à utilização dos modelos funcionais para análise de sistemas complexos. Têm sido publicados vários trabalhos focando a aplicação destes modelos às mais diversas áreas, entre as quais figuram explicitamente a manutenção e a fiabilidade. Nelson (1993) apresenta vários casos de utilização neste campo, como é o caso das centrais nucleares surgindo como vantagens a maior simplicidade computacional e a maior adequação às necessidades dos operadores dos sistemas. Não pondo em questão que tais modelos podem trazer vantagens quando está em causa a rapidez de resposta a determinado problema, o mesmo não nos parece acontecer quando a solução depende do diagnóstico exacto das causas, caso em que é necessário conhecer e analisar os eventos que tiveram lugar.

A questão do diagnóstico numa perspectiva funcional é tratada por Leitch (1993) que, para o efeito, apresenta uma metodologia de classificação das ocorrências e dos requisitos e procedimentos inerentes à utilização de um modelo desta natureza.

Price (1995) apresenta uma análise dos efeitos dos diferentes modos de avaria de sistemas electromecânicos dos automóveis também por recurso a modelos funcionais ainda durante a fase de projecto e concepção daqueles sistemas. Tal como é apresentada, a metodologia parece poder estender-se a outras áreas parecendo a sua principal vantagem a possibilidade de analisar os efeitos possíveis de uma dada falha na futura ocorrência de outra.

É diferente a perspectiva de Baker (1994) que modela os problemas de manutenção pelo recurso ao modelo do tempo desfasado em que se supõe que uma avaria não é um processo isolado mas o culminar de um processo de degradação. Ora, em termos de manutenção, essa degradação pode ser

interrompida por intervenção da manutenção. O desfasamento de tempo é o período que medeia entre o início do processo de degradação e o culminar desse processo na falha absoluta do sistema. É, assim, um modelo que se pode inserir nos modelos de ocorrências estatísticos mas não pontuais. Voltaremos a este modelo em 2.3.2.

Shanthikumar (1995) trata um caso de modelação fiabilística em que a escala de tempos é discreta, ou seja, o sistema trabalha em regime cíclico e faz-se apenas uma medição de parâmetros por cada ciclo. Neste trabalho o autor não apresenta qualquer caso concreto de aplicação que pudesse verificar ou validar o modelo apresentado em que as taxas de risco dos diferentes componentes são ordenadas em função do seu valor.

Jensen (1995) apresenta uma panorâmica dos trabalhos relativos a teorias de Fiabilidade publicados nos últimos anos, procurando caracterizar de forma geral o modelo de Fiabilidade típico. Pena é que o autor confunda taxa de avaria com taxa de risco.

Singpurwalla (1995) apresenta vários modelos para Fiabilidade de "software" dividindo-os em dois tipos, os que modelam o tempo entre falhas e os que contam o número de falhas até um dado momento. É importante a preocupação do autor em unificá-los sempre numa perspectiva de modelos pontuais (todos são modelos pontuais mas o autor considera que existem muitos modelos achando necessário que se proceda à sua sistematização). Soyer (1995) analisa mais profundamente alguns dos modelos anteriores.

Dohnal (1995) apresenta um conjunto de problemas que encontrou ao tentar otimizar os intervalos de manutenção preventiva de um conjunto de troleicarros. Foi utilizada uma distribuição de Weibull mas os autores consideram que, face à heterogeneidade dos dados, não existe grande certeza em relação às conclusões obtidas. Este trabalho é aqui referido porque, tratando-se de um conjunto de 39 carros, todos iguais embora de idades diferentes, observados durante 22 meses, tempo considerado curto pelos autores, se poderia ter encarado a utilização do modelo dos riscos proporcionais em que uma das covariáveis seria a idade dos veículos.

2.3.2 - Alguns casos de aplicação anterior do modelo de riscos proporcionais

O modelo dos riscos proporcionais foi sendo aplicado ao longo dos anos na medicina e na engenharia apresentando Leitão (1989) uma resenha das aplicações efectuadas naquelas duas áreas bem como uma comparação entre os modos de aplicar o modelo inerentes aos dois tipos de situação em causa.

Apresentam-se de seguida alguns trabalhos publicados ao longo dos anos referentes a aplicações do modelo de riscos proporcionais. Estas referências são feitas por ordem cronológica e a primeira conclusão que delas se pode retirar é o número restrito de trabalhos que, no conjunto, recorrem à aplicação desta técnica sendo ainda mais restritos os que se referem a aplicações de engenharia, os únicos que aqui se apresentam.

Cox (1972) ao apresentar o seu trabalho teve em vista, prioritariamente, o campo médico, embora tenha previsto de imediato a possibilidade de as aplicações se estenderem ao domínio da engenharia.

Cox apresenta ainda uma interpretação física do modelo, nomeadamente no que se refere aos testes de vida acelerada utilizando, com evidente paralelismo, uma variável fictícia denominada "stress". Acaba por concluir pela aplicação preferencial do modelo a casos cujas distribuições se afastem da distribuição de Weibull.

Kay (1977) aplica o método a análises de dados censurados retirados também do domínio da medicina. Apresenta vários modelos de regressão generalizando o que Cox apresentara anteriormente, flexibilizando, assim, a função dependente do tempo. Nos exemplos que apresenta mostra o ajustamento da função de risco a um modelo log-linear e a aplicação a dados estratificados por níveis de acordo com o tipo de tratamento adoptado.

Farewell (1979) aplica, novamente no campo médico, o modelo de Cox, referindo a vantagem na utilização de covariáveis variáveis no tempo. Considera vários cenários para a estimação dos parâmetros de regressão podendo assim determinar quais os parâmetros que mais influenciam a mortalidade nos casos em estudo.

Uma referência especial para Kalbfleish e Prentice (1980) pela descrição que faz do modelo, pelos conjuntos de dados que apresenta e aos quais o aplica e, ainda, pela consideração de casos aos quais aplica covariáveis variáveis no tempo.

Moreau (1985) apresenta uma variante ao modelo de Cox considerando coeficientes de regressão variáveis no tempo. Conclui pela possibilidade de divisão do eixo dos tempos em sectores como alternativa à possibilidade mais geral de considerar uma função do tempo como modo de definir os parâmetros. Mais uma vez trata-se de uma aplicação em medicina.

Mas, se a medicina forneceu, e continuará talvez a fornecer, a maioria das aplicações do modelo, o passar dos anos levou normalmente à extensão da sua aplicação à engenharia. Não é assim por acaso que os trabalhos referidos de seguida digam respeito a aplicações em engenharia.

Leitão e Newton (1989) apresentam um caso concreto de aplicação do modelo dos riscos proporcionais como uma técnica suficientemente poderosa para investigação dos efeitos de algumas variáveis relacionadas com a exploração de certos equipamentos no tempo de vida desses mesmos equipamentos. Um dos aspectos tratados reside na escolha da escala de tempos utilizada mas é dada atenção também aos problemas relacionados com a validação do modelo. Como curiosidade, refira-se o facto de ser abordada a hipótese de tratar os modos de falha como covariáveis propondo um método para realizar a comparação desses modos uns com os outros.

Bohoris e Leitão (1989) apresentam um estudo comparativo entre o modelo dos riscos proporcionais e os testes de amostragem dupla através do tratamento do mesmo caso pelos dois processos. O trabalho conclui pelas vantagens relativas dos dois processos consoante os objectivos que se pretendam; assim, os testes de amostragem são mais indicados para comparação entre amostras e o modelo dos riscos proporcionais para a modelação da variação dos riscos de funcionamento ao longo de uma dada escala de tempos dados que sejam os parâmetros de funcionamento que se consideraram relevantes.

Leitão (1989) trata apenas o modelo dos riscos proporcionais mas de uma forma alargada fornecendo uma metodologia baseada neste método para

análise da gestão da fiabilidade dos equipamentos (trazendo isso os consequentes reflexos na política de manutenção desses mesmos equipamentos). Este trabalho foca também o problema, já analisado no capítulo 1, da confusão existente na literatura da especialidade na definição de algumas variáveis, nomeadamente as taxas de avaria e de risco, e debruça-se também sobre o "software" existente para correr o modelo analisando e comparando alguns pacotes disponíveis que contemplam este modelo. Os casos tratados são bons exemplos de como o modelo dos riscos proporcionais pode fornecer resultados que satisfaçam de forma cabal os objectivos acima expostos. Para além disso, trata-se de um trabalho em que a aplicação prática é acompanhada de uma descrição completa do suporte matemático do modelo.

Lindqvist (1989) testa o modelo dos riscos proporcionais contra um modelo exponencial geral que inclui tempos de falha censurados e distribuídos exponencialmente. O modelo dos riscos proporcionais aparece como um caso particular do modelo geral. O autor recorre a métodos gráficos para teste dos modelos e tem o cuidado de verificar também a condição inicial de distribuição exponencial dos tempos. O autor utiliza dados simulados o que se terá ficado a dever ao grande número de casos que serão necessários para utilização destes métodos. O autor refere, contudo, que existem casos de aplicação prática dos métodos que expõe.

Pettitt (1990) estuda a forma como a dependência do tempo da função de risco condiciona a utilização do modelo de Cox. Usa uma extensão ao modelo introduzida por um outro autor que considera a dependência do tempo. Contudo, prefere utilizar um processo de previsão estatística para obter a função que expressa a dependência do tempo da função de risco em lugar de partir de uma função pré-determinada. Recorreu à utilização de dados simulados para testar a viabilidade do modelo mas recorreu também a dados referentes às avarias dos turbocompressores utilizados nos comboios de alta velocidade dos caminhos de ferro ingleses, tal como Leitão (1989) o havia já feito no trabalho anteriormente referido. Os resultados obtidos forneceram uma boa aproximação ao caso em estudo e, segundo o autor, ilustram bem a forma pela qual actualmente se deve conduzir um trabalho deste tipo.

Marshall (1990) utiliza o modelo dos riscos proporcionais para analisar o comportamento fiabilístico de componentes electrónicos, mais exactamente transistores bipolares, em diversos enquadramentos. Utilizou

um conjunto de dados relativamente restrito com componentes fabricados em diferentes empresas mas conclui pela exclusão de alguns parâmetros que pensara inicialmente considerar e pela possibilidade de ajustar a distribuição de Weibull a parte desses dados, referentes apenas a um número restrito de empresas. Apesar disso, o modelo dos riscos proporcionais adequa-se aos parâmetros que considerou. Este trabalho chama-nos a atenção para o tipo de covariáveis a considerar. Deverão evitar-se parâmetros que sejam consequências de avarias. O caso mais geral é a consideração de modos de avaria como covariáveis. O modo de avaria deve ser entendido apenas como o(s) processo(s) físico(s) que têm lugar ou combinam os seus efeitos de modo a produzir a avaria. São exemplos a ruptura, a deformação e a alteração química entre outros.

Baker (1991) utiliza o modelo dos riscos proporcionais e o conceito de verosimilhança parcial para testar se as acções de manutenção preventiva sobre os equipamentos têm ou não efeitos sobre os tempos de falha posteriores. Apresenta exemplos práticos daqueles testes, sendo de saudar que a manutenção preventiva apresenta efeitos positivos sobre os tempos de falha que se tornam maiores após essas acções. Para além disso, os resultados obtidos confirmam, nos casos práticos, o que já se intuía. A autora refere ainda a possibilidade de aplicação deste processo para testar os efeitos de um dado tratamento a casos médicos de ataques repetitivos.

Baker (1993a) volta a usar um modelo de riscos proporcionais para caracterizar o efeito do envelhecimento de uma máquina no tempo de falha dos seus componentes - componentes novos numa máquina velha falham mais depressa que numa máquina nova.

Srivastava (1993) apresenta quatro esquemas diferentes de censura de dados para comparar os tempos de vida de um determinado conjunto de máquinas semelhantes mas de diferentes marcas mas sem explicitar qualquer aplicação. Conclui pela futura utilização promissora da técnica introduzida, na sequência, aliás, de trabalhos pelo próprio anteriormente realizados.

Sun (1993) ao estudar a representação de uma taxa de risco múltipla utiliza o conceito de verosimilhança condicional introduzido por Cox no trabalho em que introduz o modelo dos riscos proporcionais. Apresenta várias distribuições exponenciais mas infelizmente não se refere a qualquer

caso prático de aplicação para os modelos que apresenta. Este autor designa ainda a taxa de risco por taxa de avaria.

Kumar (1993) aplica o modelo dos riscos proporcionais aos dados respeitantes a cabos eléctricos para estudar a influência das condições circundantes no tempo de vida dos cabos. Considera três covariáveis, a idade da máquina em que o cabo está montado, o número de falhas consecutivas do cabo e a ocorrência ou não de sobreaquecimento. Os resultados são apresentados mas nada é dito sobre a qualidade dos mesmos em termos de satisfação ou não de eventuais expectativas existentes.

Christer (1995) usa o procedimento já utilizado por Baker (1993b) para testar o efeito da idade das máquinas para ajustar um modelo de manutenção preventiva baseado no conceito de tempo desfasado já descrito em Baker (1994). Este trabalho possui o mérito de retratar a aplicação a um caso prático industrial, uma indústria de processamento de cobre, através dos dados fornecidos por uma extrusora. Os resultados voltaram a ser bastante bons em termos de adequação às expectativas.

Baker (1995) apresenta novos desenvolvimentos do modelo e aplicações concretas a casos mais complexos. Se os resultados de toda a técnica anterior voltam a ser concludentes, já não se compreende muito bem até que ponto os novos desenvolvimentos apresentados poderão ser úteis. Resta esperar por novas aplicações já prometidas.

2.4 - O modelo dos riscos proporcionais

O modelo dos riscos proporcionais utilizado neste trabalho é uma técnica não paramétrica que, utilizando uma função de risco log-linear, é aplicada para deduzir os efeitos que determinados factores poderão ter na fiabilidade dos equipamentos ou dos componentes, quando utilizada em engenharia. Aqueles factores são designados, conforme já referido, por covariáveis, e podem retratar situações ou parâmetros intrínsecos do material, como, por exemplo, níveis vibratórios ou propriedades das ferramentas, quando estamos a referir-nos a máquinas ferramenta, ou parâmetros exteriores, como condições do ar envolvente, parâmetros referentes aos bens produzidos, etc.

É necessário, portanto, identificar os factores que poderão ter um efeito significativo no tempo de vida do equipamento e, por isso, este será o objectivo do método. O peso de cada um dos factores em causa é expresso através dos factores de regressão, também já referidos.

Refira-se que podem existir modelos de riscos proporcionais paramétricos e não paramétricos, consoante se assuma ou não, respectivamente, à partida uma distribuição para a função de risco. Todos pressupõem a ocorrência de um processo não homogéneo de Poisson como gerador dos tempos de falha. Os modelos de riscos proporcionais são modelos exponenciais, modelos em que se pressupõe que os efeitos dos diferentes parâmetros se fazem sentir sobre a taxa de risco ou função de risco; por oposição podemos considerar os modelos de tempo de falha acelerado em que a acção se faz sentir sobre o tempo de avaria - é o caso do modelo de Weibull.

O modelo aparece-nos como uma forma de analisar dados referentes a tempos de falha para, partindo de certas condições assumidas à partida, estimar os efeitos de certos parâmetros, as covariáveis, na fiabilidade dos sistemas em estudo. É, assim, um modelo de regressão que se representa da forma

$$h(t;Z) = h_0(t) \cdot e^{(Z\beta)} \quad (2.1)$$

em que

$h_0(t)$ representa uma função de risco base arbitrária e não especificada

Z representa o vector linha das K covariáveis utilizadas e medidas

β representa o vector coluna dos K parâmetros de regressão

t representa o tempo de falha associado

Os Z 's e os β 's podem ter qualquer valor devendo t ser sempre positivo.

A função fiabilidade ou de sobrevivência $R(t;Z)$ obtém-se a partir da definição dada em 1.2.2 e da expressão 2.1 do modelo de regressão:

$$R(t;Z) = \exp \left[-\int_0^t h_0(u) \cdot e^{(Z\beta)} du \right] \quad (2.2)$$

Trata-se de uma função de sobrevivência condicional para t dados Z . Representa o efeito de potência das diferentes covariáveis na função de sobrevivência base $R_0(t)$:

$$R(t;Z) = [R_0(t)]^{e^{(Z\beta)}} \quad (2.3)$$

e em que

$$R_0(t) = \exp \left[-\int_0^t h_0(u) du \right]$$

O modelo dos riscos proporcionais aparece-nos baseado na função de risco e modela-a, como se vê, de forma a que, para um determinado conjunto de itens, essa função de risco apareça formada por um produto de dois factores; o primeiro desses factores é comum a todos os elementos do conjunto e é a função de risco base; o segundo é um termo exponencial que inclui o efeito específico das diferentes covariáveis em cada elemento.

As covariáveis Z 's podem ser contínuas, representando valores medidos e relacionados com o funcionamento dos sistemas em estudo (por exemplo, rugosidade), ou discretas, representando a presença ou ausência de um certo factor (localização, tipo de manutenção, etc.).

As covariáveis podem ainda ser externas ou internas. São externas as que são geradas independentemente do mecanismo de falha. Uma covariável interna é uma medida no tempo feita no sistema em estudo e representa sempre o efeito de um processo gerado no interior do sistema em estudo. Devido a este facto só pode ser observada durante os períodos de funcionamento do sistema (de forma geral, até à falha ou censura do caso). Como consequência disto os valores observados destas variáveis são um bom indicador do tempo de sobrevivência do sistema.

As covariáveis externas podem ser independentes ou dependentes do tempo. São independentes do tempo as covariáveis cujos valores se

mantêm, para cada caso, constantes no tempo. São dependentes do tempo no caso contrário, ou seja, não são conhecidos a priori os seus valores porque possuem distribuições marginais independentemente dos parâmetros considerados no modelo.

Quanto às covariáveis internas, é de referir que são sempre dependentes do tempo até porque não podem ser observadas após a situação de falha ou censura e têm distribuições marginais dependentes dos parâmetros do modelo.

Cada uma das covariáveis tem um efeito específico na taxa de risco geral do sistema. Esse efeito é contabilizado, para cada uma delas, pelo seu coeficiente de regressão β . Os parâmetros de regressão são desconhecidos à partida e têm, por isso, de ser calculados, ou estimados, para sermos mais exactos e porque se está perante um processo estatístico, através de processos que a seguir se descrevem. Depois de estimados, os valores obtidos deverão ser testados de modo a verificar se é efectivamente lógica a hipótese de cada uma das covariáveis escolhidas e utilizadas influenciar o tempo de vida do sistema ou, mais geralmente, o tempo de sobrevivência entre avarias.

Como as covariáveis actuam de forma multiplicativa na função de risco base, para diferentes combinações daqueles seus valores, as funções de risco assim obtidas são proporcionais umas às outras ao longo do tempo de sobrevivência sendo precisamente esta propriedade que dá o nome ao modelo.

Para que o modelo possa ser aplicado numa determinada situação há que verificar/validar antecipadamente a condição de proporcionalidade entre os diferentes valores das covariáveis.

Uma das dificuldades sentidas de início por quem pretende testar a aplicação do modelo prende-se com a selecção e definição das variáveis, problema comum à maioria dos modelos baseados em técnicas de regressão. Existem ainda problemas relacionados com a dificuldade na escolha da escala de tempos e com a inclusão de covariáveis variáveis no tempo. Esta última dificuldade será ainda maior quando, para um mesmo exemplo e uma mesma variável, houver a necessidade de considerar duas escalas de tempo diferentes.

Há, contudo, que ter em atenção que muitos dos problemas relacionados com a escolha das covariáveis poderão ser facilmente ultrapassados através do conhecimento dos sistemas em estudo e das condições em que se processa a sua utilização. Ora, nas aplicações de engenharia estas condições podem reunir-se desde que se possuam informações suficientes sobre a constituição do sistema visto que o conhecimento das condições de utilização está, à partida, assegurado.

A afirmação relativa ao conhecimento das condições de utilização deve, porém, ser entendida numa perspectiva vasta de possibilidade de conhecimento e não apenas de posse antecipada de conhecimento dessas condições. Assim, poderá ser bastante morosa a obtenção do conhecimento de algumas covariáveis internas ao sistema. Essa obtenção passará sempre, contudo, pelo conhecimento profundo das condições de operação do sistema. E é aqui que as utilizações de engenharia poderão levar vantagem em relação às aplicações médicas; no caso destas últimas pode não ser possível conhecer todas as "condições de utilização", nomeadamente aquelas que já saíram da "memória" do sistema.

O conhecimento das covariáveis internas passará sempre por duas fases distintas:

- obtenção de dados

Estes dados poderão ser obtidos através de informações sobre o sistema previamente conhecidas ou deverão ser obtidos aquando da aplicação do modelo por medições prévias.

- tratamento de dados

O objectivo é o de proceder à determinação das condições segundo as quais a covariável varia com o tempo.

Mas, para além da verificação da proporcionalidade acima referida, é importante referir que, caso a proporcionalidade não seja possível de forma global, há sempre a possibilidade de recurso à estratificação, que adiante se referirá.

Qualquer modelo não é mais que uma forma que permite, partindo de um conjunto de dados, obter um conjunto de resultados. Para aplicar o modelo dos riscos proporcionais os dados de partida constam de um determinado número de casos, as observações, em relação aos quais conhecemos os

tempos de falha (ou estão censurados) e os valores que, para cada caso, tomam as diferentes covariáveis que queremos considerar. Se N for o número de casos e n for o número de covariáveis, teremos como dados:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Casos: } 1, 2, \dots, N \\ \text{Tempos: } t_1, t_2, \dots, t_N \\ Z_1: Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{1N} \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_n: Z_{n1}, Z_{n2}, \dots, Z_{nN} \end{array} \right.$$

Um primeiro problema que se coloca, logo à partida, é o da possibilidade de ocorrência de tempos "empatados".

Entende-se por tempos "empatados" tempos de falha iguais. Por tempos de falha iguais não se devem entender acontecimentos simultâneos mas iguais tempos decorridos entre o início e o fim de duas observações quaisquer não censuradas.

A ocorrência de tempos "empatados" é uma consequência da falta de precisão com que os tempos de falha são medidos nas aplicações práticas. Note-se que nas aplicações em manutenção, quando a fonte de dados é o registo de ordens de trabalho, aparecem apenas as datas do pedido de trabalho e de fecho de obra o que conduz a tempos de falha medidos em dias (havendo que precisar qual das duas datas é a relevante para considerar como fim da observação a que diga respeito).

Como o modelo dos riscos proporcionais é, por definição, um modelo de tempo contínuo, ou seja, um modelo em que todos os pontos da escala de tempos de falha são considerados distintos, a ocorrência de um número elevado de tempos "empatados" causa alguns problemas no cálculo da verosimilhança e na convergência do processo.

Desenvolveram-se, assim, métodos aproximados para quantificar a influência de cada conjunto de tempos "empatados" na função de

verosimilhança e, também em muitos casos, se procede, em alternativa, à soma ou à subtracção de tempos aleatórios, da ordem da centésima da unidade de tempo considerada, a cada tempo "empatado". Foi este último o processo seguido para "desempatar" tempos nas aplicações descritas nos capítulos 3 e 4.

Cox (1972) avança logo com um primeiro método aproximado de "desempate" e Leitão (1989) indica um outro que é também utilizado nas rotinas informáticas. Como neste trabalho não se recorre a tais métodos, não são aqui apresentados.

O modelo permite-nos obter como resultados os valores da função de risco base para cada caso, os coeficientes de regressão para as n covariáveis e ainda valores da função de risco para as combinações que queiramos dos valores das covariáveis. Como é óbvio, só interessarão as combinações correspondentes a situações com existência concreta.

A função de risco base representa a função de risco que o sistema apresentaria se todas as covariáveis tomassem o valor zero. O zero de uma dada variável pode ser um zero incluído num domínio contínuo da variável ou um zero discreto correspondendo normalmente à não verificação de uma dada condição. É importante, por isso, que as variáveis discretas binárias tomem os valores 0, 1 pois, caso contrário, a função de risco base perderá o seu significado físico (Leitão, 1989).

A função de risco base pode ser estimada de dois modos:

- fazendo-a tomar a forma de uma distribuição específica

Neste caso, o modelo de riscos proporcionais adoptado será do tipo paramétrico. A forma mais comum será a de Weibull. Isto facilitará a estimação dos parâmetros de regressão como se verá em 2.5 através do cálculo, a título de exemplo, da função de verosimilhança para aquela distribuição.

- deixando-a livre

Este processo, devido a Cox (1972) é o que normalmente se segue e através do qual se consegue aumentar a flexibilidade do modelo. A função é estimada directamente a partir dos dados e terá que ser sempre maior ou igual a zero. O modelo assim tomado torna-se uma técnica não paramétrica.

O modelo dos riscos proporcionais, como técnica não paramétrica, possui a vantagem de se poder modelar o comportamento fiabilístico do sistema sem ter de recorrer a qualquer distribuição pré-definida mas a complexidade resultante de não se considerar uma técnica paramétrica é uma importante desvantagem pelo que só se deverá aplicar o modelo assim resultante naqueles casos em que os ganhos daí resultantes sejam consideráveis quer pelo custo dos equipamentos envolvidos quer pelas diminuições de perdas de produção e de qualidade dos produtos produzidos.

2.5 - Os coeficientes de regressão

Nesta secção proceder-se-á à descrição dos dois principais processos de estimação dos coeficientes de regressão para o caso em que se considera a função de risco base não definida à partida. Esta situação implica a adopção de processos alternativos de construção de verosimilhança que serão descritos em 2.5.1.

A função de verosimilhança representa a probabilidade de obter os valores que temos como dados. O modelo tem que calcular os coeficientes de regressão que maximizam aquela probabilidade.

Nas situações em que existem observações censuradas, a verosimilhança aparece como o produto do "piatório" dos valores da função densidade de probabilidade dos casos de falha pelo "piatório" dos valores da função fiabilidade para os casos censurados (eq. 2.12).

Por contraponto e a título de exemplo é deixada aqui a dedução da função de verosimilhança para a distribuição de Weibull a dois parâmetros.

Seja então:

$$h(t) = \alpha \beta t^{\beta-1} \quad (2.4)$$

com $t > 0$ e em que α e β são constantes positivas. A expressão 2.4 pode considerar-se como uma forma geral de escrita da taxa de risco obtida a partir da distribuição de Weibull com parâmetros α e β .

As funções densidade de falhas e densidade de falhas acumulada serão, respectivamente:

$$f(t) = \alpha \beta t^{\beta-1} \exp(-\alpha t^\beta) \quad (2.5)$$

e

$$F(t) = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) \quad (2.6)$$

com $t > 0$.

Se $X_1, \dots, X_n$ forem variáveis aleatórias independentes que obedeçam à distribuição de Weibull com parâmetros α e β desconhecidos, pode-se empregar a aproximação da verosimilhança máxima para que se possam calcular aqueles parâmetros. Da equação 2.6 podemos retirar a verosimilhança

$$L(x_1 \dots x_n) = \alpha^n \beta^n x_1^{\beta-1} \dots x_n^{\beta-1} \exp(-\alpha \sum_{i=1}^n x_i^\beta) \quad (2.7)$$

E, tomando logaritmos:

$$\ln L(x_1 \dots x_n) = n \cdot \log \alpha + n \cdot \log \beta + (\beta - 1) \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i - \alpha \sum_{i=1}^n x_i^\beta \quad (2.8)$$

Derivando agora em ordem a α e a β obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \ln L(x_1 \dots x_n) = \frac{n}{\alpha} - \sum_{i=1}^n x_i^\beta \quad (2.9a)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \ln L(x_1 \dots x_n) = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln x_i - \alpha \sum_{i=1}^n x_i^\beta \ln x_i \quad (2.9b)$$

Igualando as equações 2.9 a zero podemos obter as soluções para as estimativas de verosimilhança máxima para os parâmetros da distribuição de Weibull.

Os dois processos alternativos para a estimativa dos coeficientes de regressão são designados por verosimilhança condicional e verosimilhança

marginal mas só trataremos aqui o primeiro porque nos casos tratados nos capítulos 3 e 4 os coeficientes são estimados dessa forma. Ambos os processos se podem encontrar descritos em Kalbfleish e Prentice (1980).

2.5.1 - Estimativas por verosimilhança

O método da verosimilhança condicional assenta no conceito de probabilidade condicional de um indivíduo i falhar no momento t_i sabendo-se que esteve em risco e sobreviveu até esse momento. Esta probabilidade é dada por

$$\frac{\exp(Z_i\beta)}{\sum_{l \in R(t_i)} \exp(Z_l\beta)} \quad (2.10)$$

em que

- $R(t_i)$ representa o conjunto de unidades em funcionamento em t_i
- Z e β - ver eq. 2.1

Para uma dada amostra aleatória de N unidades ou indivíduos com K tempos de falha e $N - K$ tempos censurados, com os tempos de falha representados por $t_1 < \dots < t_k$ e usados por esta ordem, do menor para o maior, portanto, cada falha contribui com um factor daquela forma. A verosimilhança condicional representa o produto de todos os factores daquela forma associados aos K tempos de falha observados. Será:

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^k \left[\frac{\exp(Z_i\beta)}{\sum_{l \in R(t_i)} \exp(Z_l\beta)} \right] \quad (2.11)$$

Como não pode ser derivada como uma probabilidade condicional de realização de um evento observável sob determinadas condições impostas pelo modelo adoptado, a função 2.11 não pode ser considerada uma função de verosimilhança no sentido restrito do termo. Para que isso

aconteça, Cox (1972) apresentou o conceito de verosimilhança parcial. O significado físico aparece diluído mas pode-se pensar que a verosimilhança parcial representa a razão entre a probabilidade de uma falha ocorrer um dado tempo após a falha anterior, com um determinado padrão das covariáveis, e a probabilidade de falha no mesmo momento com qualquer padrão.

Seja então a mesma amostra aleatória de N unidades com K tempos de falha e a sua função de verosimilhança

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^k f(t_i; \beta) \cdot \prod_{i=k+1}^N R(t_i; \beta) \quad (2.12)$$

em que

$f(t; \beta)$ - função densidade de probabilidade

$R(t; \beta)$ - função fiabilidade ou de sobrevivência

Como as funções de base não são especificadas à partida, não é possível avançar directamente a partir da expressão anterior. Contudo, aplicando as relações vistas em 1.2, é possível reordenar os termos de forma a obter uma expressão que inclua a verosimilhança condicional (2.11):

A expressão de verosimilhança condicional (2.11) é a única parte da verosimilhança que contribui para a estimação dos coeficientes de regressão. Considerar a verosimilhança na forma 2.12 tem a vantagem de permitir a utilização com muitos tipos de dados censurados, que entram no segundo factor do produto o que tem bastante interesse em Fiabilidade quando se consideram diferentes modos de avaria.

Cox (1972) sugere

$$\frac{\exp(s_i \beta)}{\sum_{l \in R(t_i; m_i)} \exp(s_l \beta)} \quad (2.13)$$

como contribuição, em termos de probabilidade, para a função de verosimilhança condicional em que s_i é a soma das covariáveis das unidades que falharam em t_i e o somatório no denominador indica que a

soma se faz para todos os conjuntos de m unidades pertencentes ao conjunto de risco $R(t)$.

Leitão (1989) apresenta uma outra forma, devida a Breslow, que, segundo este autor, é a que vem sendo correntemente utilizada nas rotinas informáticas, nomeadamente no pc-90 da BMDP:

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^k \left[\frac{\exp(s_i \beta)}{(\sum_{l \in R(t_i)} \exp(Z_l \beta))^{d_i}} \right] \quad (2.14)$$

em que

$s_i = \sum Z_{ij}$ - soma das covariáveis das unidades que falharam em t_i

d_i - nº de unidades que falharam em t_i

2.5.2 - Processos de estimação

Designam-se por processos de estimação as formas pelas quais se procede ao cálculo dos valores de β que maximizam a função de semelhança entretanto estabelecida por um dos processos anteriores (2.5.1).

Para que esse cálculo seja efectuado recorre-se ao logaritmo da função de semelhança e, depois, à derivação da função de semelhança logarítmica assim obtida. A obtenção dos valores máximos de β obriga ao cálculo das derivadas parciais de primeira e segunda ordem em ordem a cada um dos β 's.

A verosimilhança logarítmica condicional pode definir-se a partir de 2.14 como

$$\ln L(\beta) = \sum_{i=1}^k s_i \beta - \sum_{i=1}^k \ln \left[d_i \sum_{l \in R(t_i)} \exp(Z_l \beta) \right] \quad (2.15)$$

que apresenta como derivadas parciais de primeira ordem em relação a β

$$\frac{d \ln L(\beta)}{d\beta_j} = \sum_{i=1}^k (s_{ji} - d_i A_{ji}(\beta)) \quad (2.16)$$

em que

$$j=1,\dots,s$$

s_{ji} - elemento j do vector s_i

$$A_{ji}(\beta) = \frac{\sum_{l \in R(t_i)} Z_{jl} \exp(Z_l \beta)}{\sum_{l \in R(t_i)} \exp(Z_l \beta)}$$

Os simétricos das segundas derivadas parciais são

$$-\frac{d^2 \ln L(\beta)}{d\beta_h d\beta_j} = \sum_{i=1}^k d_i c_{hji} \quad (2.17)$$

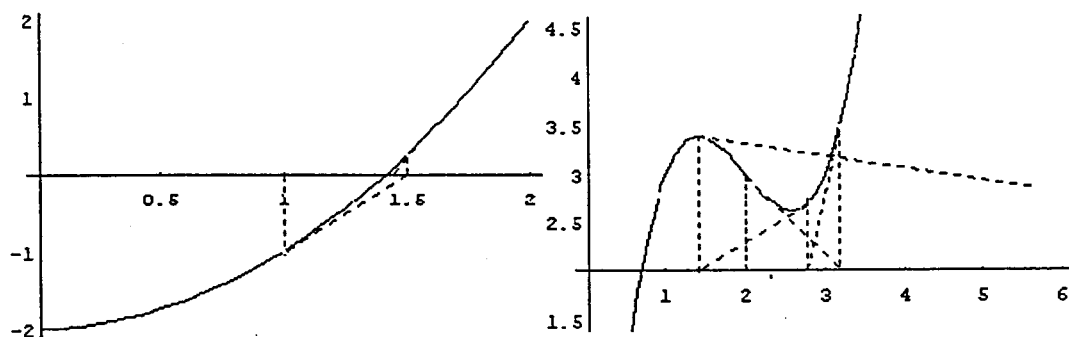
em que

$$c_{hji} = \frac{\sum_{l \in R(t_i)} Z_{hl} Z_{jl} \exp(Z_l \beta)}{\sum_{l \in R(t_i)} \exp(Z_l \beta) - A_{hi}(\beta) A_{ji}(\beta)}$$

com $h, j = 1, \dots, s$

Os valores de β que maximizam 2.14 são encontrados de forma iterativa pelo método de Newton-Raphson recorrendo às expressões 2.15 e 2.16.

O método de Newton- Raphson é um processo iterativo de resolução de equações não lineares em que a função é aproximada por uma sua tangente, no conceito geral do termo. Trata-se de um método que, caso convirja, o faz de modo bastante rápido (quadraticamente). Tem, contudo, o problema de, para que possa ser aplicado com segurança, ser aconselhável salvaguardar à partida a convergência pois, como se pode observar na figura 2.1, é fácil isso não acontecer.



Esquema representativo da forma convergência
do método de Newton-Raphson
Figura2.1

Na figura tem-se

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (2.18)$$

Para que haja convergência é suficiente que existam as derivadas da função, pelo menos até à ordem do espaço em que ela é representada, na(s) vizinhança(s) do(s) seu(s) zero(s). Sendo ξ um ponto dessa vizinhança é ainda necessário que

$$0 < m_1 \leq |f'(\xi)| \leq M_1 \quad \text{e} \quad |f''(\xi)| \leq M_2$$

Nesse caso a relação entre os erros obtidos na iteração k e na iteração $k+1$ é

$$|e_{k+1}| \leq \frac{M_2}{2m_1} \cdot |e_k|^2 \quad (2.19)$$

O valor do zero z é obtido, em cada iteração, através do desenvolvimento da função em série de Taylor. Para a iteração k vem, com $\xi_k \in \text{int}(z, x_k)$:

$$z = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} - \frac{f''(\xi_k)}{2f'(x_k)}(z - x_k)^2 \quad (2.20)$$

No caso concreto em estudo, a expressão inicial para o método de Newton-Raphson é

$$\beta = \beta_0 + I(\beta_0)^{-1} \cdot U(\beta_0) \quad (2.21)$$

em que I e U representam, respectivamente, as matrizes das segundas e primeiras derivadas parciais de $\ln L(\beta)$.

Uma das desvantagens do método é a necessidade de calcular, para cada iteração, a primeira e segunda derivadas. Uma outra era, até há pouco, a necessidade de inversão matricial que (2.21) pressupõe.

A convergência é obtida de forma rápida dependendo o critério do valor que se quiser adoptar para a relação entre o valor de β obtido na iteração k e a diferença entre esse valor e o que tivera sido obtido na iteração anterior. É comum, atendendo à rapidez da convergência do método, tomar como aceitável para fim das iterações que a diferença entre os valores acima referidos seja da ordem da milionésima parte do valor do último β obtido:

$$|\beta_{i+1} - \beta_i| = 10^{-6} \cdot |\beta_{i+1}| \quad (2.22)$$

O método de Newton-Raphson ou de Newton tem sido objecto de estudo por parte de muitos autores podendo a sua descrição, demonstração dos critérios de convergência e da rapidez desta última uma vez aqueles satisfeitos, etc. ser facilmente consultadas. Leitão (1989) apresenta alguns autores que trataram o caso da sua aplicação ao caso concreto do modelo dos riscos proporcionais para estimação dos valores de β .

Para além do critério de convergência enunciado, é possível considerar também, como normalmente acontece com o "software" disponível, o critério adicional alternativo do número máximo de iterações a realizar.

Mas, para além da estimativa dos coeficientes de regressão, pode-se estimar, uma vez conhecidos (ou estimados...) aqueles, a função de risco base não paramétrica. É esse processo que será abordado já de seguida em 2.6.

2.6 - Funções de risco e de sobrevivência base

Tendo sido obtidas as estimativas dos parâmetros de regressão, podem também obter-se estimativas para a função de risco base e a função de sobrevivência ou fiabilidade.

O modelo dos riscos proporcionais permite fornecer estimativas para ambas as funções. Como se trata de um modelo não paramétrico, a obtenção destas estimativas não necessita de qualquer condição adicional imposta ao processo (aleatório) que tenha estado na base da geração de ambas as funções, tenha esse processo tido origem no próprio sistema em estudo ou na análise do seu histórico como é, aliás, comum em manutenção, o que faz com que a estimativa se baseie apenas na contribuição de cada falha.

A primeira aproximação considerada foi introduzida por Cox (1972) que considerou a função de risco base idênticamente nula em todos os pontos excepto naqueles em que tinha havido a ocorrência de uma falha. Isto originava um processo bastante complexo tendo, por isso, sido desenvolvidos processos alternativos.

Não se fará aqui uma retrospectiva desses diversos métodos; ir-se-á apenas descrever sumariamente o processo utilizado no "software" BMDP que é utilizado para a obtenção dos resultados deste trabalho.

O processo utilizado na rotina 2L do "software" pc-90 da BMDP é o processo designado de Breslow e Link. É um processo baseado numa alternativa apresentada por Breslow logo na discussão do trabalho de Cox (1972) e em que a função de risco base é tomada como constante entre os pontos de falha mas não necessariamente nula.

Será

$$h_0(t) = h_0 \quad (2.23)$$

com $t_{i-1} < t < t_i$ como condição necessária para que 2.23 seja válida.

Os valores dos h_{0i} , para cada i , serão os que maximizam a função de verosimilhança. A sua obtenção faz-se através da igualização a zero da primeira derivada parcial do logaritmo da verosimilhança, como já se descreveu anteriormente, e ainda a partir de

$$h_{0i} = \frac{1}{t_i - t_{i-1}} \cdot \frac{d_i}{\sum_{l \in R(t_i)} \exp(Z_l \beta)} \quad (2.24)$$

em que d_i representa o número de falhas em t_i .

Face a isto, a estimativa da função de risco acumulado virá:

$$H_0(t) = -\ln[1 - R_0(t)] = \sum_{i=1}^k \left[\frac{d_i}{\sum_{l \in R(t_i)} \exp(Z_l \beta)} \right] \quad (2.25)$$

O processo utilizado no "software" BMDP baseia-se numa forma generalizada deste processo construída para incluir os pontos de falha e uma estimativa da função de risco base em qualquer momento. Assim, a estimativa da função de risco acumulado virá modificada, em relação a 2.25, para:

$$H(t; Z) = \exp(Z\beta) \cdot \int_0^t h(u) du \quad (2.26)$$

2.26 representará uma estimativa teórica, porque contínua, da função de risco que, na forma discreta se poderá escrever

$$H(t; Z) = \exp(Z\beta) \cdot \left[\sum_{i=1}^k (t_i - t_{i-1}) \cdot h_{0i} + (t - t_k) \cdot h_{0k+1} \right] \quad (2.27)$$

em que h_{0i} é definido de acordo por 2.24 e

$$\begin{aligned} t_i &< t \leq t_{i+1} \\ t_0 &= 0 \end{aligned}$$

A partir da estimativa da função de risco base pode-se estabelecer também a estimativa da função de sobrevivência base ou função de fiabilidade base.

Será:

$$R_0(t) = \exp [-H(t;0)] \quad (2.28)$$

A função de sobrevivência estimada, para um determinado conjunto de valores das covariáveis, será definida por:

$$R_0(t;Z_p) = [R_0(t)]^{\exp(Z_p\beta)} \quad (2.29)$$

em que

Z_p - conjunto de valores das covariáveis tomado como referência para o cálculo em causa

2.7 - Particularidades do modelo

Descrito que foi o modelo, passar-se-á à apresentação, embora sumária e enfatizando apenas a sua utilidade, de algumas particularidades que podem ser de aplicação interessante aquando do estudo de alguns casos. Entre elas avultam a estratificação, as covariáveis mudas e a análise dos resíduos. Da mesma forma pode ser encarada a utilização de covariáveis variáveis no tempo que, contudo, pela sua importância neste trabalho, são tratadas em secção especial (2.8).

2.7.1 - Estratificação

O modelo dos riscos proporcionais pressupõe que as covariáveis actuem de forma multiplicativa na função de risco. Esta condição faz com que, para uma dada variável independente, a razão entre os valores da taxa de risco calculados a partir de diferentes valores dessa variável seja constante ao longo do tempo.

Ora, tendo o modelo dos riscos proporcionais a capacidade de poder ser adoptado num grande conjunto de tipos de problemas, seria um factor bastante restritivo que todos os diferentes parâmetros envolvidos num dado problema tivessem que satisfazer aquela condição. Para a contornar utiliza-se, para os casos em que algumas covariáveis possam não a satisfazer ou aparentem, pelo menos, não terem o referido efeito multiplicativo na função de risco, um processo de estratificação dos dados de modo a que a função de risco varie faseadamente ao longo de cada um desses estratos dos dados.

Este processo aparece sugerido e tratado em Kalbfleish e Prentice (1980) que modificam o modelo apresentando-o, para este caso, da seguinte forma:

$$h_j(t; z) = h_{0j}(t) \exp(\beta z) \quad (2.30)$$

em que

j - um de s diferentes estratos

$h_{0j}(t)$ - função de risco arbitrária

A função de risco arbitrária pode ser diferente de estrato para estrato mas os coeficientes de regressão são os mesmos para todo o conjunto de dados. Com o modelo estratificado a função de verosimilhança é o produto das verosimilhanças calculadas para cada estrato separadamente.

O modelo estratificado pode também ser usado para testar se uma determinada covariável verifica a condição de proporcionalidade. Para os diferentes estratos considerados, calcula-se o logaritmo da função de risco base acumulada ao longo do tempo. Se, para cada momento, as diferenças entre os logaritmos calculados se mantiverem constantes, há proporcionalidade.

2.7.2- Covariáveis mudas

Quando existem mais que 2 níveis numa determinada variável definidora, como é o caso, por exemplo, da caracterização das diferentes

rectificadoras no caso principal em análise neste trabalho, há que recorrer às chamadas covariáveis mudas. Com efeito, embora uma variável discreta possa tomar valores, por hipótese inteiros, superiores a 1, isso, na prática, poderia conduzir a resultados incorrectos. Com efeito, escolhida uma variável discreta, o melhor ajustamento passaria sempre pelo menor ou pelo maior dos valores assumidos por essa variável.

Por outro lado, a escolha das variáveis mudas torna a escolha do termo base da comparação perfeitamente arbitrária, ou seja, os coeficientes obtidos apenas variam no que respeita à comparação com o padrão tomado.

Além do exposto, as covariáveis mudas permitem sempre escalonar de forma correcta os sistemas em análise ou os seus diferentes níveis como variável discreta. Para n níveis da variável discreta ter-se-á sempre que ter $n-1$ covariáveis mudas, o que não causa problemas à corrida do modelo.

A utilização das variáveis mudas pode trazer, contudo, algumas desvantagens. Assim, torna-se mais difícil a compreensão do modelo e do conjunto de variáveis utilizados; uma outra desvantagem, bem menor, porém, é o maior tempo de cálculo para a corrida do modelo.

A maior desvantagem reside, contudo, no facto de o uso de covariáveis mudas poder conduzir a dificuldades de convergência do modelo quando a variável discreta independente que foi "desdobrada" em covariáveis mudas possuir, em cada nível, poucas observações de falha registadas. Ao "desdobrar", poderá acontecer que uma ou outra das covariáveis mudas se torne "monótona" em relação à variável dependente por falta de observações registadas.

A utilização das covariáveis mudas será analisada mais adiante de forma mais concreta aquando da descrição dos casos em estudo.

Nos casos apresentados no capítulo 4 não chegaram a ser utilizadas covariáveis mudas porque, para cada caso, eixos e balanceiros, existiam apenas duas máquinas. No capítulo 3, contudo, recorre-se à utilização de covariáveis mudas para caracterização dos pontos de medida de nível vibratório. Apresenta-se de seguida o exemplo das covariáveis mudas utilizadas para caracterização desses pontos de medida no moinho em estudo e a forma pela qual as diferentes variáveis ficaram organizadas

numa base de dados referente a um dado modo de avarias, no caso das rectificadoras.

Covariáveis mudas

Designação no modelo utilizado: *DP1 / DP2*

Tipo de variável: *discreta*

Entidades a que respeita: *pontos de medição de nível vibratório (2/3/4)*

A figura 2.2 mostra um excerto de uma base de dados referente ao caso do moinho que é um exemplo da utilização de variáveis mudas. As diferentes colunas referem-se, respectivamente e da esquerda para a direita, ao tempo de sobrevivência, à situação do caso (censurado ou não), à carga (pot), ao nível de alarme vibratório (vib), às covariáveis mudas (DP1 e DP2) e à indicação de alinhamento imediatamente anterior ao caso (al) ou não (entre parêntesis estão os nomes dados no terceiro capítulo às covariáveis).

surv	rej.	pot	vib	DP1	DP2	al
8.0187	1	1150	1	0	1	1
3.0205	1	1400	1	1	0	0
4.0206	1	1200	1	0	1	0
6.0304	1	1300	1	1	0	0
29.0489	1	900	1	0	1	1
4.0588	0	***	0	0	1	1
29.0622	1	900	1	0	1	0
17.0630	1	850	1	0	1	0
1.0672	1	756	1	0	1	0
3.0716	1	850	1	1	0	0
35.0000	1	850	1	0	1	0
8.0717	1	1750	0	0	0	0
3.0763	1	1850	1	0	0	0
3.0816	1	1820	1	0	0	0
10.0000	1	1825	1	0	0	0
6.0820	1	1600	1	0	0	0
7.0878	1	1700	1	1	0	0
1.0944	1	1800	0	1	0	0
7.1010	1	1750	0	1	0	0
7.1062	1	1750	0	1	0	0
17.1067	0	1800	0	1	0	1

Representação parcial de uma das bases de dados
utilizadas neste trabalho

Figura 2.2

2.7.3 - Testes de adequação por análise de resíduos

De cada vez que se aplica um modelo deste tipo a um determinado caso há que verificar a adequação do mesmo às condições e aos dados em estudo. Têm, por isso, surgido diferentes técnicas, suficientemente referidas em Leitão (1989), entre as quais figuram os chamados métodos dos resíduos.

Um dos métodos mais simples baseados nos resíduos é o método de Cox e Snell utilizado na rotina BMDP 2L. Restam, contudo, alguns problemas por resolver pois o cálculo dos resíduos, por si só, não é suficiente para validar o modelo e, além disso, não parecem estar definidos padrões suficientemente claros para análise dos resíduos.

Mas, para verificação do ajustamento de um modelo estatístico aos dados em análise é necessário analisar também as relações entre o modelo de ajustamento e as observações individuais realizadas. Uma dessas relações é a influência de uma dada observação no ajustamento obtido para o modelo. A identificação dos pontos de influência pode alterar a interpretação do ajustamento e permite verificar a estabilidade do respectivo modelo adoptado. Um determinado caso pode considerar-se influente se se observou falha quando, em termos relativos pelo menos, o risco de ela vir a ocorrer era baixo, comparado com outros casos observados, ou, caso contrário, quando não houve falha num caso em que esse risco era grande.

Um outro aspecto da relação entre o modelo de ajustamento e as observações individuais é o grau de concordância entre uma dada observação e o modelo ajustado. Uma discordância exagerada pode indicar a existência de alguma violação às condições impostas pelo modelo que pode ir desde a falta de independência entre observações à falta de especificação de algum termo de regressão (alguma covariável que deveria ter sido considerada e não o foi).

Os resíduos surgem como o processo mais óbvio de investigar a qualidade de um determinado ajustamento visto que é normal que as análises de regressão determinem a concordância entre os casos observados e o modelo estatístico a eles ajustado.

A base para o método dos resíduos de Cox e Snell apareceu exposta num trabalho daqueles autores, de 1968, e a filosofia geral é a de que, no caso de o modelo ser adequado, os resíduos comportar-se-ão como uma amostra censurada com variâncias aleatórias de tipo exponencial unitário. Desta forma, aqueles autores indicam que é necessário identificar os casos que ficam completamente fora do ajustamento através da análise da "função" de sobrevivência dos resíduos.

Os resíduos serão dados por

$$e_i = -\ln R(t_i; Z_i) \quad (2.31)$$

com $i = 1, \dots, n$, ou por

$$e_i = \exp(Z_i \beta) H_0(t_i; 0) \quad (2.32)$$

em que

$H_0(t; 0)$ - função acumulada de risco base obtida a partir do modelo de ajustamento e calculada de acordo com a equação 2.27

Calculados os resíduos, pode-se estimar de seguida a função de risco acumulado para esses mesmos resíduos recorrendo. Virá:

$$H(e) = \sum_{j=1}^l \left(\frac{d_j}{D_j} \right) + (e - e_l) \frac{d_{l+1}}{D_{l+1}} \quad (2.33)$$

em que

$$e_l < e, e_{l+1} \geq e, e_0 = 0$$

d_i - número de casos que já falharam em t_i

D_j - número de casos ainda em risco

Se o modelo estiver bem ajustado à situação em estudo, a representação gráfica da função de risco acumulada para os resíduos em função dos resíduos observados será, aproximadamente, uma linha recta de declive unitário.

Um dos problemas associados a esta técnica é, contudo, o de não se encontrar definido qual deve ser o critério para considerar se uma dada aproximação é boa ou má, ou seja, quanto e como se pode afastar da recta de declive unitário a representação da função de risco dos resíduos observados em função desses resíduos.

2.8 - Covariáveis dependentes do tempo

A inclusão de covariáveis dependentes do tempo é uma das mais interessantes possibilidades do modelo dos riscos proporcionais e também uma das que lhe confere maior flexibilidade. Contudo, o seu uso deve ser encarado com alguma precaução devido às dificuldades inerentes à definição destas variáveis.

A utilização de covariáveis dependentes do tempo permite que se realize o ajustamento permanente do modelo às condições específicas que são representadas pela(s) variável(eis) em questão ao longo do tempo de vida desse equipamento.

Mas a utilização de covariáveis dependentes do tempo pode servir apenas para testar a validade da hipótese de que, para dois sistemas diferentes, a razão entre as suas taxas de risco não varia ao longo do tempo. Este é, aliás, um dos usos mais divulgados para as covariáveis variáveis no tempo e é suficientemente descrito em BMDP (1992).

São, contudo, também úteis quando alguma covariável é monitorizada de forma contínua ao longo do tempo. Ora, se esta condição é bastante difícil de conseguir em utilizações no campo da Medicina, porque, a menos que o paciente esteja colocado em regime de internamento constantemente monitorizado, não é possível controlar a variação no tempo dessas variáveis, já o mesmo não se passa em termos de Engenharia onde muitos processos industriais são monitorizados de forma permanente em relação às variáveis consideradas de importância para o processo.

As covariáveis dependentes do tempo podem ser externas ou internas (ver 2.4). As diferentes formas de classificar este tipo particular de covariáveis aparece suficientemente descrito em Kalbfleisch e Prentice (1980) importando reter que se entendem por covariáveis externas as que não dependem directamente de factores em observação e internas as que

medem factores directamente associados aos mecanismos de falha que estão a ser estudados. A título de exemplo, a covariável associada ao nível vibratório dos sistemas em estudo é uma covariável interna dependente do tempo. Veremos adiante o conjunto de problemas associado à sua medição, controlo e modelização.

Como acima se referiu, é possível obter monitorizações permanentes de sistemas industriais. Já será mais difícil, embora essa dificuldade varie consoante o caso em estudo, obter uma relação válida para a sua variação no tempo. Ao contrário, no campo médico poderá tornar-se mais difícil a monitorização mas torna-se mais fácil o estabelecimento da relação causa-efeito de um determinado acontecimento na sobrevivência do doente, se esse acontecimento tiver ocorrido já na fase de observação/tratamento, e o estabelecimento da relação de variação com o tempo das covariáveis dependentes do tempo que tenham sido identificadas.

As considerações acima levam também, devido às dificuldades, embora de tipo diferente, que surgem na introdução no modelo destas variáveis no campo da engenharia e no campo médico, a que nem todo o "software" disponível no mercado para a realização deste tipo de análise desenvolva este procedimento da mesma forma, ou de forma tão facilmente utilizável, que o faz para as covariáveis não dependentes do tempo.

As covariáveis dependentes do tempo podem ser usadas também para a obtenção de informação sobre o próprio mecanismo de falha ou, de outro modo, sobre os factores que levam a que a falha venha a ocorrer. Leitão (1989) dá alguns exemplos sobre este tipo de utilização mas, convém desde já referir, esta possibilidade está presente precisamente no caso em que a covariável se relaciona com o nível vibratório dos equipamentos.

O modelo dos riscos proporcionais, quando se usam covariáveis dependentes do tempo, é modificado em relação à forma original. Assim, a função de risco deverá depender do tempo e do conjunto de covariáveis não dependentes do tempo mas também da ou das covariáveis dependentes do tempo.

Será, de forma geral:

$$h(t; Z; Z(t)) = h_0(t) \exp(Z_1\beta_1 + \dots Z_k\beta_k + Z(t)_1\beta_{t1} + \dots Z(t)_j\beta_{tj}) \quad (2.34)$$

em que:

$Z(t)$ - vector das j covariáveis dependentes do tempo

β_{tj} - coeficiente de regressão associado à j ésima covariável dependente do tempo

Kalbfleisch e Prentice (1980) e Cox (1972) apresentam alguns casos em que o modelo é aplicado com uma covariável dependente do tempo com uma função logarítmica e uma função linear, respectivamente. BMDP (1992) apresenta um caso de aplicação de uma covariável dependente do tempo segundo uma função logarítmica ao teste da condição de proporcionalidade dos efeitos. Os anexos IX e XI ilustram como se devem adaptar os cálculos nos casos de utilização de covariáveis dependentes do tempo. É importante referir (ver anexo XI, e)) que para o cálculo da verosimilhança, quando contabilizamos casos que ainda não falharam, o valor da covariável dependente do tempo é o valor que ela toma no momento da falha que origina cada parcela do somatório.

As dificuldades da aplicação de covariáveis dependentes do tempo continuam a residir basicamente na determinação da dependência entre os diversos factores que influenciam o tempo de vida do equipamento. Têm sido propostos alguns processos para verificação dos efeitos das covariáveis ao longo do tempo de vida dos equipamentos e para, em função disso, julgar da necessidade e/ou da vantagem em adicionar uma covariável variável no tempo ao modelo. Leitão (1989) refere alguns mas considera-os de difícil aplicação. O uso de covariáveis dependentes do tempo torna-se mais acessível nos casos em que se torna viável o recurso a modelos paramétricos. Petersen (1982) apresenta um estudo deste tipo aplicável a um modelo geral completamente definido de forma paramétrica.

2.9 - Considerações gerais e conclusões

Neste sub-capítulo comentam-se em forma de conclusão as condições e as razões para utilização do modelo dos riscos proporcionais.

Neste segundo capítulo enquadrrou-se e apresentou-se o modelo dos riscos proporcionais na sua forma não paramétrica. Deu-se especial atenção ao significado dos diferentes conceitos envolvidos e à forma pela qual são estimados os resultados que se pretendem obter. No fundo, pensou-se ser importante definir os pontos de partida e de chegada e o caminho a percorrer.

O modelo dos riscos proporcionais proporciona, como se viu, uma forma de avaliar o peso que cada um dos factores, seleccionados como influentes em potenciais processos conducentes a avarias nos equipamentos, tem na taxa de risco com que esses equipamentos estão a funcionar num determinado momento.

Está-se, na maior parte dos casos, na presença de equipamentos que podem avariar devido a diferentes causas. Uma dessas causas irá, em determinado momento, fazer com que a próxima avaria lhe possa ser imputada. Ou seja, todas as causas poderão estar presentes num determinado momento mas uma delas irá progredir mais rapidamente que as outras em direcção à situação de ruptura. O modelo dos riscos proporcionais pode servir como ferramenta para previsão dos efeitos, no funcionamento dos equipamentos, da remoção ou da adição de um certo factor de risco ou causa de avaria. Para isso, é necessário definir uma variável que indique a presença ou ausência desse factor no momento da análise. Determina-se então o efeito de cada uma das causas de avaria no tempo de vida do equipamento.

A identificação dos factores de risco pode ser, porém, uma tarefa complexa, principalmente porque se torna importante essa identificação antes que o equipamento avarie. É comum existirem casos em que algumas das causas de avaria estão identificadas e outras não, necessitando de análises de histórico baseadas num largo período de tempo, por vezes recorrendo a equipamentos homólogos, para que possam ser suficientemente explicitadas.

Outra questão relacionada com esta aproximação é a independência entre as diversas causas de avaria. Só uma análise específica, caso a caso, pode permitir retirar conclusões a este respeito pois haverá situações de perfeita independência e outras em que tal não acontece. Assim, por exemplo, o nível vibratório de uma bomba centrífuga pode depender de problemas

relacionados com a tubagem mas pode apenas estar relacionado com o desequilíbrio do impulsor.

Este problema dos riscos múltiplos é abordado em Kalbfleish e Prentice (1980), que o designam por riscos "competitivos", através, essencialmente, de exemplos retirados do campo médico mas explanando de forma geral os problemas inerentes a uma análise deste tipo como, nomeadamente, a estimativa das relações entre covariáveis, a relação entre diferentes tipos de avarias dadas as condições em estudo e as taxas de avarias resultantes para avarias de certo tipo após a remoção de outras das causas de avaria.

Leitão (1989) apresenta uma aproximação ao último tipo de problema através do modelo de riscos proporcionais representando como

$$h_j(t;Z) = h_0(t)\exp(Z\beta_j) \quad (2.35)$$

a taxa de risco resultante para a causa de avaria j quando todas as outras causas estão ausentes, isto é, estatisticamente censuradas. Apresenta ainda uma outra aproximação baseada no modelo de estratificação apresentado em 2.7.1 em que a taxa de risco base aparece estratificada de acordo com as diferentes causas de avaria. O autor apresenta ainda as condições a que ambos os modelos, assim modificados, devem obedecer sendo de destacar a que considera que os diferentes tipos de avaria deverão ocorrer em diferentes componentes do sistema em estudo e que, além disso, deverão ser independentes uns dos outros. Esta condição põe, assim, fora de causa o estudo dos efeitos de diferentes causas em avarias diferentes do mesmo componente.

Um dos aspectos relacionados com a análise dos diferentes modos de avaria é o da possibilidade de estes poderem ser incluídos como covariáveis no modelo. Esta situação, considerada por Marshall (1990) no seu trabalho sobre componentes electrónicos, merece, contudo, alguns comentários.

Assim, é comum nas aplicações médicas em que uma determinada causa de morte pode ser diagnosticada em vida do doente que continua a viver ainda durante um certo tempo entre o diagnóstico e o momento da morte. É, assim, possível considerar uma covariável definidora dessa causa de morte que toma o valor 0 antes do diagnóstico e o valor 1 após esse

diagnóstico se efectuar (apesar de poder estar presente antes só seria possível atribuir-lhe o valor 1 nessa situação se, ao diagnosticar, fosse possível indicar desde quando se encontraria presente mediante a análise do grau de evolução no momento do diagnóstico). Nos sistemas industriais esta situação não corresponde à realidade nos casos em que só após a avaria se determinam as suas causas como é o caso da quase totalidade dos componentes eléctricos e electrónicos e de grande parte dos mecânicos.

O problema que se põe, nas aplicações industriais, é o de considerar se é legítimo que a ocorrência de um dado modo de avaria pode aumentar ou diminuir a possibilidade de ocorrência de uma outra avaria posterior. Isso, efectivamente, não parece ser facilmente compreensível e, por isso, considerar os modos de avaria como covariáveis deve ser encarado com alguma ponderação.

Do que ficou dito, parece transparecer a ideia de que aparecem dois conceitos diferentes de encarar a situação: o factor de risco, facilmente passível de ser encarado como covariável, e o modo de avaria, cuja consideração como covariável deve ser cuidadosamente analisada.

Parece, ainda, ser possível fazer mais alguns comentários. Com efeito, se no campo médico não oferece dúvidas a consideração do factor de risco como covariável e no campo industrial, conforme se viu, a consideração do modo de avaria como covariável se torna problemática, já nos parece ser possível, neste último caso, e em certas circunstâncias, a possibilidade de consideração do factor de risco como covariável exactamente nas mesmas condições em que tal se aplica ao campo médico. Como exemplo, considere-se o caso da existência de uma instalação de tubagem na qual se coloca uma bomba centrífuga sabendo-se à partida que a altura de aspiração é demasiado elevada. A bomba funcionará logo de início com elevados níveis de ruído e de vibração devidos a cavitação. É possível mantê-la a funcionar durante um certo tempo para determinar qual o tempo de sobrevivência naquelas condições (o objectivo pode ser, por exemplo, determinar qual a margem de manobra dos serviços de manutenção a partir do momento em que é detectado um problema daquele tipo num equipamento semelhante).

Alguns destes problemas podem ser ultrapassados se se escolher como escala de tempos outra que não a de sobrevivência. É o caso da escolha,

por exemplo, dos tempos de reparação após a ocorrência de um determinado tipo de avaria; aí já se compreende a inclusão dos modos de avaria como covariáveis do modelo.

Kalbfleish e Prentice (1980) referem ainda a possibilidade de se usarem covariáveis variáveis no tempo para contabilização de diferentes factores de risco. Os indicadores de risco seriam regularmente medidos ao longo do tempo de duração do estudo e, por regressão, definiriam essas covariáveis. Haveria sempre que testar a independência entre os diferentes modos de avaria.

Outra situação relacionada com a aplicação do modelo dos riscos proporcionais é a escolha entre as diversas alternativas que se podem colocar para obter o melhor desempenho em termos fiabilísticos. Para isso há que determinar quais, de entre os factores testados através do modelo dos riscos proporcionais, têm um efeito significativo no comportamento do equipamento.

Para verificar quais os factores significativos existem alguns processos que implicam que o modelo seja corrido iterativamente de forma inversa de forma a retirar os factores que não sejam significativos. Leitão (1989) apresenta o método de Wald e o método da razão da verosimilhança e BMDP (1992) apresenta o anterior e o método PHH (das abreviaturas dos nomes dos seus autores).

É de considerar, porém, a hipótese de, devido a razões relacionadas com o funcionamento dos equipamentos, não serem retiradas algumas covariáveis independentemente de serem ou não significativas estatisticamente.

Para a resolução dos casos estudados neste trabalho recorrendo ao modelo dos riscos proporcionais utilizou-se o "software" PC-90, versão Dynamic, da BMDP. No anexo II analisa-se e comenta-se mais em pormenor algumas questões relacionadas com a utilização deste "software".

Vamos passar de seguida a uma contabilização mais geral das condições de utilização do modelo.

O modelo dos riscos proporcionais, pelas suas características, estará indicado, à partida, nestas situações:

- necessidade de avaliação da influência de vários parâmetros na fiabilidade do equipamento;
- impossibilidade ou dificuldade em ajustar um modelo do tipo paramétrico à entidade (componente, equipamento ou sistema) que se pretende estudar;

A primeira situação está normalmente associada a processos de produção ou funcionamento complexos ou por existirem factores externos variados ou por existirem vários parâmetros igualmente importantes a controlar. Como exemplo do primeiro tipo de uma situação deste género, veja-se o caso da produção de bens influenciados por condições ambientes como pressão, humidade ou temperatura que podem sempre ser utilizadas em conjuntos padrão como covariáveis fixas. Para o segundo tipo, basta considerar a necessidade de avaliar variáveis de condição em conjunto com variáveis de processo.

A segunda situação está associada a equipamentos complexos cujo conhecimento possa não ser completo ou em que seja difícil avaliar as interacções conjuntas entre componentes.

Mas o modelo dos riscos proporcionais possui algumas desvantagens que não são de desprezar. Estão relacionadas com a complexidade da análise que lhe está associada, o que encarece a sua aplicação restringindo-a a situações em que estejam envolvidos equipamentos de alto custo em termos patrimoniais ou de falha, e com a selecção das variáveis a introduzir no modelo.

A complexidade da análise começa, de imediato, pela necessidade de recorrer a "software" sofisticado que, para além dos custos de aquisição e instalação, hoje em dia não demasiadamente significativos, impõe um domínio da sua utilização por parte dos técnicos de manutenção.

A aplicação do modelo necessita, ainda, de um conjunto de dados que poderá ser obtido após tratamento das variáveis do processo, obtidas directamente ou por recurso a medições efectuadas especificamente para esse efeito. A selecção destas covariáveis já resultou entretanto de análise prévia, passando, por exemplo, por um estudo de independência (baseado na utilização de um programa como o que se apresenta no anexo V) e é complementada por uma análise de significância estatística como referido em BMDP (1992).

Como vantagens e razões para a aplicação deste modelo, refira-se, e dentro das condições já referidas acima, a falta de informações fornecidas pelo fabricante, nomeadamente no que se refere a equipamentos complexos; há, com efeito, por vezes parâmetros que não vêm equacionados de modo suficiente e, também, nesses casos, os fabricantes não têm grande possibilidade de proceder a estudos de fiabilidade dos seus equipamentos devido a aumento exagerado de custos e à impossibilidade de obtenção de dados suficientes em tempo útil (ou seja, antes de modificar um dado modelo, caso se esteja perante um fabrico minimamente em série o que, nestes casos até nem acontece sempre).

Existe ainda a possibilidade de utilizar covariáveis variáveis no tempo, situação a ter em conta quando existem, por exemplo, covariáveis contínuas não medidas pelo processo e cuja variação poderá ser avaliada com base num conjunto razoável de medições específicas.

A utilização daquelas covariáveis leva-nos, contudo, a considerar também os diferentes tipos de covariáveis que podem ser introduzidas no modelo como covariáveis fixas ou dependentes do tempo. As covariáveis podem ser internas ou externas, sendo que as primeiras não estão directamente relacionadas com o mecanismo de falha e as segundas são medidas sobre ou anexamente à entidade em causa ao longo do tempo de sobrevivência. As covariáveis internas têm ainda a particularidade de só poderem ser medidas quando o mecanismo está a trabalhar sem falha. É claramente o caso da rugosidade dos balanceiros a que se refere o capítulo 4. Repare-se que a vibração pode ser medida com o equipamento em falha, em vazio ou, até, parado (nível base).

As covariáveis externas podem ser fixas, definidas ou auxiliares. As primeiras são conhecidas *a priori* e as variáveis auxiliares resultam da acção de um processo estocástico externo que não envolve os parâmetros do modelo de falha. O nível vibratório pode ser encarado como uma variável fixa ou auxiliar (este último caso será comentado no capítulo 6).

As covariáveis internas são o resultado de um processo estocástico gerado pela entidade em estudo e é por isso que só são observáveis durante o tempo de funcionamento. São sempre dependentes do tempo.

Kalbfleisch e Prentice (1980) tratam estes aspectos de forma detalhada e apresentam ainda outros tipos de covariáveis dependentes do tempo.

O modelo dos riscos proporcionais aparece, assim, como um modelo poderoso que pode equacionar os mais diversos factores, que pode tratar sistemas reparáveis e não reparáveis e que pode comportar dados censurados e/ou não censurados, conforme refere Bendell (1985). A este respeito, refira-se que Bendell e Walls (1985) referem vários processos de tratar os dados para introdução em modelos de fiabilidade, referindo ajustamentos de destino, mas de uma forma geral, em termos de covariáveis, todos se podem aplicar ao modelo dos riscos proporcionais, dependendo da escala de tempos a utilizar.

Viu-se que o modelo dos riscos proporcionais é um modelo estatístico não paramétrico que encara a ocorrência de falha como um processo pontual e que permite a aferição simultânea do efeito de vários factores na fiabilidade dos equipamentos. Recapitula-se de seguida o seu enquadramento.

Estando os modelos determinísticos limitados na sua utilização ao conhecimento prévio das relações físicas entre os diversos factores em causa, pretendeu-se nesta secção apresentar um balanço de vantagens e inconvenientes dos modelos estatísticos mais conhecidos, por comparação com o modelo dos riscos proporcionais.

Os modelos estatísticos foram considerados mais flexíveis no sentido em que são passíveis de se estenderem a um campo mais alargado de aplicações. É ainda possível integrá-los em modelos funcionais.

Vimos que os modelos estatísticos poderiam ser paramétricos ou não paramétricos. Em termos de abordagem do processo de ocorrência de falha, podem-se utilizar modelos em que a falha é entendida como um processo pontual ou outros em que é encarada como o resultado de um processo de degradação contínua. Há até modelos que optimizam a política de manutenção preventiva a partir da interrupção desses processos.

As vantagens do modelo dos riscos proporcionais residem, resumidamente, na não necessidade de imposição de qualquer distribuição, à partida, para as variáveis, contínua ou pontual, e na possibilidade de

equacionar os efeitos simultâneos de vários factores (covariáveis) na fiabilidade dos equipamentos.

As desvantagens surgem na complexidade da análise, principalmente quando se consideram covariáveis variáveis no tempo, e na morosidade da recolha dos dados. Nenhuma destas desvantagens existem nos modelos que se baseiam em distribuições contínuas de fiabilidade que se podem seleccionar de acordo com os tipos de equipamentos em estudo para obter previsões globais de fiabilidade ao fim de um determinado tempo de funcionamento. Só que estes processos não permitem discriminar factores específicos de influência nem permitem, por isso, avaliar causas para as variações de fiabilidade.

Os processos pontuais pressupõem a ocorrência de avarias perfeitamente definida no tempo. Ora, o critério de avaria é muitas vezes arbitrário e incompatível com uma definição tão pontual no tempo, dependendo, antes, da degradação contínua dos equipamentos ao longo do tempo de funcionamento ou sobrevivência. Esta condição aparece, assim, como uma desvantagem relativa para os processos pontuais. Contudo, nestes processos não é necessário esperar pela ocorrência de avarias para definir, por exemplo, o estimador para a taxa de renovação.

A condição de "pontualidade" arrasta a condição de tempos de reparação pequenos quando comparados com os tempos de funcionamento entre avarias. Entrar em linha de conta com estes factores já representa, contudo, uma vantagem quando se comparam estes modelos com os de distribuição contínua, tanto mais que isto se consegue sem grande aumento da complexidade do modelo.

Convém referir que o mais simples dos processos pontuais (Poisson homogéneo) impõe uma taxa de ocorrência constante. Se esta for variável no tempo já se deve optar por um processo não homogéneo.

Por outro lado, todos estes processos supõem que não há alteração do desempenho dos equipamentos após reparação o que não é de todo em todo passível de ser considerado como geral. A título de exemplo atente-se no que acontece nas situações estudadas no capítulo 4 com a covariável referente à rugosidade das peças produzidas. Esta situação, só por si, levaria a pôr de parte a utilização de qualquer destes modelos nos nossos casos.

A finalizar, apresentam-se algumas conclusões referentes ao enquadramento do modelo dos riscos proporcionais no universo dos modelos de fiabilidade.

Este capítulo pretendeu fornecer um enquadramento geral do modelo dos riscos proporcionais no conjunto dos métodos que a Fiabilidade coloca ao dispôr dos gestores da Manutenção dos diversos equipamentos. Pretendeu-se que esse enquadramento se fizesse numa perspectiva de inserção do modelo na teoria geral da Fiabilidade, de continuidade na acção após aplicação (aferição de resultados obtidos com resultados de um modelo de optimização da manutenção preventiva). A manutenção preventiva pode ser encarada, conforme referido no capítulo 1, numa perspectiva sistemática ou numa perspectiva de condição. O modelo dos riscos proporcionais, tal como foi aplicado, contempla sempre a perspectiva de intervenção condicionada visto que se consideram como falhas as paragens para afinações provocadas pela constatação da observação de valores menos satisfatórios do parâmetro de qualidade. Contudo, note-se que a manutenção preventiva condicionada contem, na sua aplicação, as tarefas de inspecção/aferição/controlo que são realizadas de forma sistemática. É de acordo com esta situação que os modelos de optimização se podem compatibilizar com o modelo dos riscos proporcionais.

Neste capítulo apresentaram-se as razões que justificaram a escolha do modelo dos riscos proporcionais como o mais indicado para aplicação nas duas situações estudadas neste trabalho, o moinho autogéneo e as rectificadoras.

Essas razões são:

- possibilidade de não definir à partida qualquer distribuição específica para ajustamento de uma função de fiabilidade;
- possibilidade de avaliar o efeito simultâneo de vários factores/parâmetros na fiabilidade do conjunto para os diversos modos de avaria definidos;
- possibilidade de tratar covariáveis no tempo com a vantagem que se obtem, por este facto, no estabelecimento de uma relação entre parâmetros de qualidade e parâmetros de condição.

3 - Aplicação a um moinho autogéneo

3.1 - Introdução e apresentação

Este capítulo descreve a aplicação do modelo dos riscos proporcionais a um equipamento mecânico dinâmico e apresenta as conclusões que dessa aplicação se podem retirar no que respeita às condições de funcionamento desse equipamento e às previsões das consequências que essas mesmas condições podem vir a ter no funcionamento desse equipamento ou, mais precisamente, na taxa de risco e na fiabilidade do equipamento.

Após se proceder à apresentação do equipamento, procede-se à indicação dos parâmetros considerados como característicos para este estudo, à descrição desses parâmetros e das razões pelas quais são considerados relevantes e descrevem-se as formas segundo as quais foram medidos ou calculados. Finalmente, apresentam-se os resultados, procede-se à sua análise e retiram-se as respectivas conclusões.

O moinho autogéneo (ver 3.2) considerado encontra-se integrado numa instalação industrial de lavagem e concentração do minério retirado de uma mina de pirite situada em Aljustrel. A moagem situa-se à entrada dessa instalação, recebendo o moinho o minério após a saída deste pela boca da mina, e é feita em duas etapas sendo o moinho aqui considerado, designado por moinho secundário, aquele que efectua a moagem correspondente ao segundo nível.

A aplicação dos modelos de fiabilidade está intimamente relacionada com as políticas de manutenção adoptadas e a adoptar. Assim, a não adopção de uma política de manutenção condicionada inviabilizará a obtenção de dados estatisticamente significativos dos parâmetros de condição dos equipamentos e, nos casos em que um estudo deste tipo vem a ser bem sucedido, as conclusões daí retiradas podem ser preciosas quanto às indicações que podem fornecer em termos de parâmetros a controlar,

periodicidades de controlo e respectivas dependências e delineamento de políticas de manutenção a adoptar.

3.2 - O equipamento estudado

3.2.1 - Características

Entende-se por moinho autogéneo um moinho em que a moagem se realiza através do choque de partículas de maiores dimensões com outras de dimensões menores sendo esse choque induzido pelo movimento de rotação do moinho. Como condições para a realização deste processo figuram as especificações dos limites mínimos e máximos para a granulometria das partículas de maiores e de menores dimensões à entrada e dos limites máximos para a granulometria das partículas à saída.

No moinho aqui considerado realiza-se uma moagem húmida, ou seja, o minério entra no moinho como parte integrante de um escoamento de água com partículas em suspensão.

O moinho que serviu para a recolha dos dados que estão na base deste trabalho é de fabrico sueco (Morgardshammar CRKK 5163) e está dimensionado para uma velocidade de 70% da velocidade crítica. Possui uma potência instalada de 2100 kW e foi calculado para uma carga volumica de 45 % do total do volume interior consumindo, nesta situação, uma potência de 1515 kW.

É importante referir que o accionamento do moinho se faz a partir de um motor eléctrico sendo o movimento de rotação transmitido por engrenagem cilíndrica de dentes helicoidais com a particularidade de o carreto estar montado no veio motor e de a roda estar integrada no próprio corpo do moinho havendo por isso, atendendo ao diâmetro exterior do moinho (ver fig. 3.1) uma relação de diâmetros roda/carreto elevada.

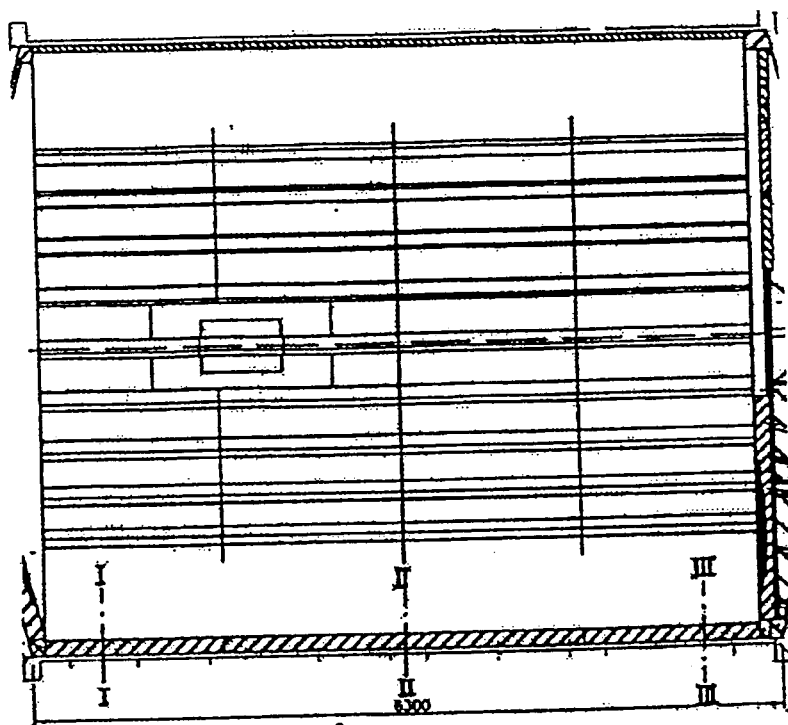
A figura 3.3 ilustra esquematicamente o conjunto do moinho. Através dessa figura pode-se observar que o conjunto possui dois eixos principais, o eixo em que o moinho está montado (através de dois apoios de rolamento) e um outro, materializado por dois veios ligados por uma embraiagem, no qual se encontram a caixa de engrenagens que constitui o

variador de velocidade e o motor eléctrico responsável pelo accionamento. O veio do motor encontra-se apoiado em duas chumaceiras e o veio do variador e do carreto, alinhado com o anterior através da embraiagem, conta com dois apoios de rolamento. A ligação entre os dois eixos do conjunto realiza-se através da engrenagem.

As dimensões interiores do corpo do moinho são:

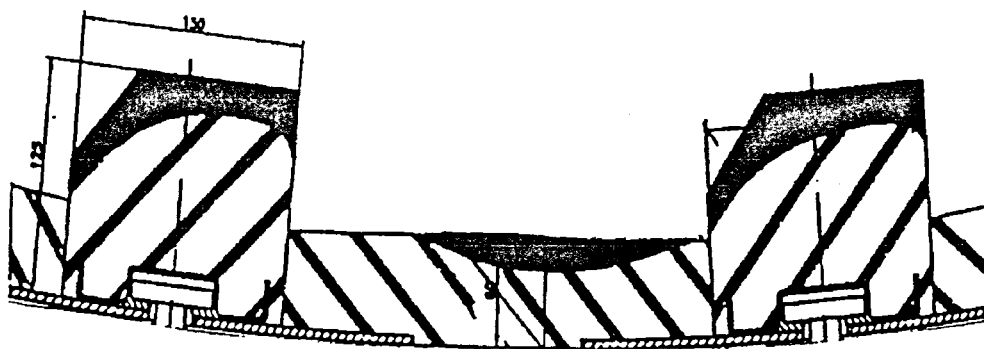
- diâmetro 5100 mm
- comprimento 6300 mm

Na figura 3.1 apresenta-se um esquema do moinho sendo importante referir o revestimento interior constituído por peças em borracha (as "forras") montadas de acordo com o esquema que se representa na figura 3.2 e que servem para induzir turbulência na movimentação da massa dentro do moinho aumentando, assim, o número de choques entre as partículas e facilitando a moagem.



Corpo do moinho

Figura 3.1



Arranjo das forras no moinho
Figura 3.2

3.2.2 - Parâmetros considerados

O estudo deste caso é baseado na obtenção de valores para parâmetros de funcionamento e para parâmetros de condição do moinho. Como parâmetros de funcionamento são considerados relevantes a carga e o enchimento e como parâmetro de condição é considerado o nível vibratório.

Torna-se indispensável, contudo, tecer algumas considerações sobre os parâmetros acima referidos.

3.2.2.1 - Parâmetros de funcionamento

Como se referiu consideraram-se como parâmetros de funcionamento

- a) - a carga
- b) - o enchimento.

Por carga deverá entender-se a potência consumida pelo moinho em funcionamento. Por enchimento terá que ser entendida a percentagem, em relação ao volume total do moinho, ocupada pela suspensão formada pela água e pelas partículas a moer dentro do moinho.

Convém referir que interessa considerar apenas os parâmetros que, de alguma forma, sejam relevantes para o estudo que pretendemos fazer, ou seja, para o estudo da fiabilidade do moinho. Ora, a fiabilidade do moinho

está relacionada directamente com o desalinhamento, o nível vibratório, o desgaste das forras e a falta de lubrificação dos apoios e do variador de velocidade. São aqueles, efectivamente, os quatro factores que podem levar à paragem do moinho por avaria. A lubrificação é controlada directamente de forma sistemática e o moinho não pára por esse motivo. O desgaste das forras está relacionado com uma outra variável de funcionamento, a granulometria do minério a moer. Contudo, essa substituição acaba por ser feita de modo sistemático tornando-se a influência da granulometria, para esse efeito, quase desprezável. A substituição das forras obriga, contudo, a paragem do moinho. Voltaremos a este assunto em 3.3 e em 3.4.

Interessa-nos, portanto, considerar apenas os parâmetros de funcionamento relacionados com o alinhamento do moinho, nomeadamente no que respeita ao acerto da roda com o carreto (ver fig. 3.3), e o nível vibratório. Aparecem-nos, assim, a carga e o enchimento.

O enchimento tem uma grande influência no nível vibratório porque, por exemplo, se o moinho estivesse cheio, funcionaria de modo equilibrado e o nível vibratório seria normalmente reduzido. Contudo, por razões que apontaremos a seguir, o moinho não pode funcionar cheio. Sendo assim, o nível vibratório dependerá do enchimento. Consideremos, então, o moinho com um dado enchimento e imaginemos o arrastamento desse enchimento pelo movimento de rotação do moinho. A determinada altura a parte superior do enchimento, o minério que está mais acima, precipita-se para a parte inferior do moinho provocando um choque e a respectiva vibração. Como é evidente, o momento em que isto ocorre e a intensidade do choque dependem do enchimento, através do ângulo de rotação capaz de provocar o desprendimento e da distância a que, por via desse ângulo e da quantidade de minério, o material que se desprende se encontra do fundo.

Destinando-se este caso apenas a testar a utilização do modelo dos riscos proporcionais não iremos apresentar aqui modelos de regressão para relacionamento destes parâmetros. É importante, porém, referi-los em relação à carga e ao enchimento do moinho.

Com efeito, se existem dados para a carga do moinho já o mesmo não se pode dizer do enchimento pelo que, em 3.3.2, se terá de descrever o modo como esses valores foram obtidos.

3.2.2.2 - Parâmetros de condição

O parâmetro de condição principal considerado foi o nível vibratório mas, também aqui, interessa tecer alguns considerandos, começando por definir que nos estamos a referir ao nível vibratório medido nos apoios do conjunto, conforme se pode observar na figura 3.3.

Antes do mais refira-se que o nível vibratório pode ser aferido de várias formas analisadas no Anexo III.

Wowk (1991), após a apresentação do problema, faz uma resenha dos modos pelos quais se pode proceder à medição do nível vibratório e dos diferentes conjuntos de equipamentos que se podem utilizar para cada um desses casos.

A obra referida apresenta ainda outros assuntos relacionados com as formas de vibração de diferentes equipamentos que serão referidos ao longo deste trabalho sempre que tal se torne necessário.

Face aos considerandos que podem ser encontrados no Anexo III, o nível vibratório, considerado aqui como variável de funcionamento, foi aferido através da aceleração do movimento vibratório recorrendo-se à utilização de acelerómetros piezoeléctricos.

As condições impostas pela utilização dos acelerómetros serão também analisadas no Anexo III estando as situações concretas, respeitantes aos casos estudados, descritas nas secções referentes à obtenção dos dados.

Mas há que referir que, neste caso, sendo o nível vibratório considerado como um dos principais aferidores da condição do equipamento ele era condicionante directo da paragem do mesmo. Com efeito, definido que estava um nível vibratório de alarme, o funcionamento era interrompido sempre que esse nível era atingido. Face a isso o nível vibratório foi aqui considerado como uma variável discreta tomando os valores 1 ou 0 consoante no momento de interrupção do funcionamento ou da observação ultrapassasse ou não, respectivamente, o nível de alarme.

No caso do moinho aqui estudado pretendeu-se juntar as vantagens da utilização de acelerómetros às da utilização da velocidade como indicador

de nível vibratório (ver 3.3.3.2) pelo que, apesar de se terem utilizado acelerómetros, o nível vibratório foi aferido através da velocidade do respectivo movimento.

O nível de alarme foi fixado em 7 mm/s (valor quadrático médio de velocidade) sendo:

- nível vibratório < 7 vib = 0
- nível vibratório ≥ 7 vib = 1

em que vib designa a variável representativa do nível vibratório.

Mas, nesta fase de funcionamento do moinho, a principal causa de vibração era o desalinhamento do conjunto. Por isso foi considerada uma variável associada ao (des)alinhamento do moinho em relação aos eixos do conjunto (ver 3.2.1), também discreta. Essa variável tomou o valor 1 se o caso considerado fosse o primeiro após a realização de um alinhamento (realizado, por isso, na paragem que antecedeu essa observação) ou o valor 0 no caso contrário.

O alinhamento considerado ao longo deste período deve ser encarado, em cada passo, como uma tentativa para obter o alinhamento perfeito. De facto, ao longo da sua vida útil, o moinho terá que vir a ser realinhado várias vezes mas esse realinhamento enquadrar-se-á em períodos mais longos. Há que considerar que:

- o moinho foi montado inicialmente com desalinhamento
- estava-se na fase inicial de funcionamento, ou seja, na zona descendente da curva da banheira
- por vezes, o realinhamento realizou-se de forma incorrecta

Em resumo, os parâmetros de condição são:

- a) nível vibratório
(parâmetro principal)
- b) alinhamento
(parâmetro acessório)

considerados segundo as formas analisadas em pormenor em 3.3.3.

3.2.3 - Pontos de medição

Como se viu na secção 3.2.2, a utilização do equipamento define-se através dos parâmetros de funcionamento e dos parâmetros de condição. O processo de fabrico é responsável pela medição dos parâmetros de funcionamento e o serviço de manutenção é responsável pela observação dos parâmetros de condição.

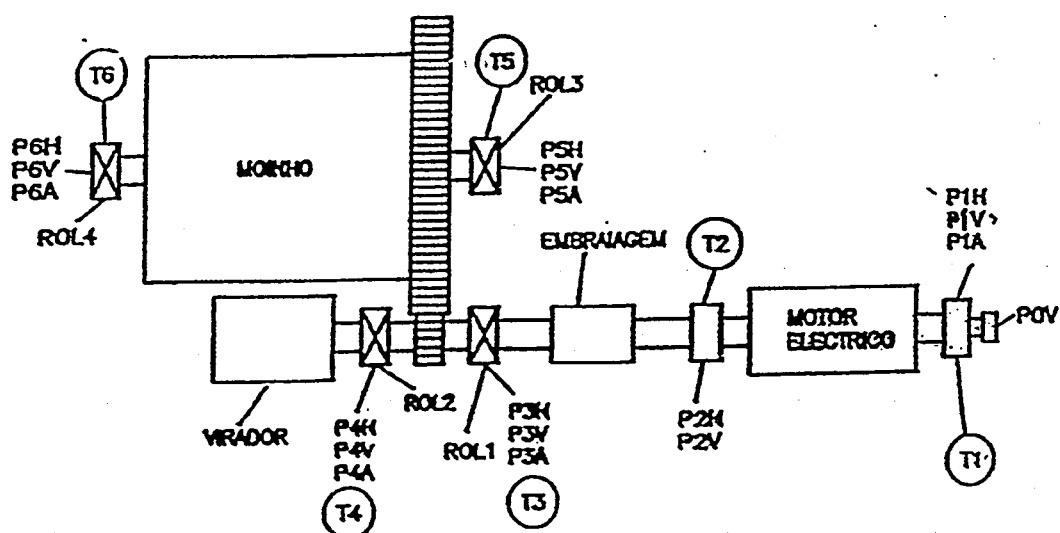
Em relação a estes últimos, viu-se em 3.2.2.2 que a aferição do nível vibratório se efectuará por recurso a acelerómetros. Essa aferição terá que ser levada a cabo em pontos que se considerem característicos e aos quais seja possível aceder através da colocação do acelerómetro.

Por outro lado não é indiferente para a aferição do nível vibratório o local e a forma de colocação do acelerómetro, ou seja, a direcção segundo a qual se efectua a medição.

Assim, para cada ponto, poderá proceder-se à medição segundo a direcção vertical, a direcção horizontal (perpendicular ao veio) e a direcção axial.

A figura 3.3 representa os pontos de medição considerados para o conjunto dinâmico em que se integra o moinho secundário e constituído por:

- motor eléctrico
- embraiagem
- variador de velocidade
- engrenagem transmissora (carreto motor e roda movida)
- moinho



Esquema do equipamento com localização dos pontos de medição de vibrações e de temperatura

Figura 3.3

com pontos de medição colocados nas caixas dos quatro rolamentos e nas duas chumaceiras de apoio.

Nos mesmos pontos procedia-se também a um controlo de temperaturas que, visto nunca se ter verificado falta de lubrificação, está intimamente relacionado com o nível vibratório e, como se viu, com o desalinhamento.

Na figura 3.3 indica-se também, para cada ponto, as direcções segundo as quais se efectuaram medições do nível vibratório: H - horizontal, V - vertical e A - axial.

Conforme exposto em 3.3.3.2, os pontos cujos valores de nível vibratório medidos se revelaram significativos foram os pontos 2, 3 e 4 (na figura 3.3, o número de cada ponto é facilmente aferido pois figura à frente do índice de temperatura no interior dos pequenos círculos e antes do indicador de direcção da medida, H, V ou A).

Veremos em 3.3.3 como foram considerados os valores relativos ao nível vibratório para cada ponto.

3.3 - Obtenção dos dados

Nesta secção serão tratados os aspectos relacionados com a obtenção dos dados, nomeadamente no que se refere ao equipamento utilizado, às relações entre variáveis e às formas de inferência utilizadas e, ainda, no que se refere, quanto à base de dados, à definição dos valores das variáveis.

3.3.1 - Nível vibratório

Para a recolha dos valores relativos ao nível vibratório foi, para este caso, utilizada a opção do acelerómetro com amplificador de sinal incorporado (ver Anexo III), através de um acelerómetro de voltagem ligado ao analisador espectral CSI 2115 descrito em CSI (1992). Na figura AIII 2 apresenta-se um esquema da instalação.

Conforme se pode observar na figura 3.43, os níveis vibratórios foram medidos em vários pontos e, em cada um desses pontos, segundo as três direcções do espaço. Observe-se que a instalação representada esquematicamente na figura AIII 2 diz respeito, para as tarefas relacionadas com os trabalhos de recolha de dados que tornaram possível o estudo deste caso, a um conjunto portátil de equipamentos de medição. Ou seja, no fundo, a figura 3.3 representa também uma rota de inspecção definida para os níveis vibratórios e temperaturas do conjunto em que o moinho se integra.

Em momentos previamente definidos ou ditados pelas condições de funcionamento do moinho, o inspector, munido do respectivo equipamento, o modelo CSI 2115 e seus acessórios para o nível vibratório, percorre a rota tomando para cada ponto três medições, uma para cada uma das direcções já acima definidas, devendo para isso, e para cada medição, colocar o acelerómetro na posição conveniente. Os locais para colocação dos acelerómetros e as respectivas formas de colocação dos mesmos foram, para o efeito, previamente definidos.

Apresentam-se de seguida as características do conjunto CSI utilizado começando por referir que o analisador CSI 2115 inclui as baterias de carga necessárias para o funcionamento do acelerómetro de voltagem, conforme se pode ver em CSI (1992).

a) baterias

- incluídas em CSI 2115
- recarregáveis, níquel-cádmio, 24.0 V
- 1.2 A.h
- capacidade para 10 horas de uso ininterrupto

b) acelerómetro

- tipo voltagem
- modelo CSI 350
- sensibilidade 100 mV/G $\pm$ 5%
- resposta em frequência a $\pm$ 10% de 2 a 2000 Hz
- gama de temperaturas de utilização de 0 a 85 °C
- tensão de 18 a 30 V DC
- corrente de 2 a 10 mA

Este conjunto de características verifica todas as condições descritas no Anexo III como referências para uma boa utilização de acelerómetros face aos fins a que se destinam, como aliás também se pode verificar em Wowk (1991). O peso e dimensões do acelerómetro referido são perfeitamente desprezáveis face às dimensões dos equipamentos em estudo e dos componentes em que, para cada ponto de medição, foram colocados, pelo que não são aqui referidos.

O conjunto completo de características deste acelerómetro pode ser encontrado em CSI (1991b).

É importante referir desde já que a utilização de um acelerómetro para esta situação se justificou apenas pela grande comodidade que a sua utilização proporciona em termos de mobilidade e portabilidade pois não restam dúvidas que o transdutor de velocidade tem uma maior sensibilidade na gama de frequências em que se trabalhou neste estudo. Voltaremos a este assunto em 3.3.3.

c) analisador de vibrações

- modelo CSI 2115-PX
(trata-se de um equipamento portátil com 2.5 Kg de peso)



- sensores aceites
(acelerómetros, sensores de velocidade, tacómetros e termómetros)
- écran LCD
- frequências seleccionáveis em contínuo desde 10 Hz até 30 kHz
- unidades
 - aceleração em g's
 - velocidade em mm/s ou in/s
- 1 Mbyte de memória expandível até 1.5 Mbyte
- temperaturas de utilização de -10 °C até 50 °C
- capacidade para armazenamento até 13500 espectros

Em CSI (1992) existe informação completa sobre o analisador CSI 2115.

d) interface com a manutenção condicionada

Após a recolha dos dados procedeu-se à sua descarga para o "software" *Mastertrend* CSI a fim de que pudesse proceder-se à sua análise e à sua utilização tendo em vista uma política de manutenção condicionada dos equipamentos. As características deste "software" bem assim como as funções que realiza encontram-se descritas em CSI (1991a).

3.3.2 - Carga e enchimento

Os valores da carga do moinho, entendendo-se neste contexto por carga a potência consumida, foram obtidos directamente a partir do controlo do processo que se realiza de modo automático saindo fora do âmbito deste trabalho quaisquer considerações sobre o mesmo.

Contudo, o mesmo controlo não fornece quaisquer indicações sobre os valores do enchimento, variável considerada com influência relevante no funcionamento do moinho, pelo que os valores obtidos para esta variável não puderam ser obtidos de forma directa.

Miettunen *et al* (1993) mostram a forma segundo a qual as variáveis carga e enchimento se encontram relacionadas para um moinho do mesmo tipo e forma que aquele que serviu de base a este estudo e que processa um minério de tipo aproximado e sob a mesma forma.

Aqueles autores apresentam um conjunto de dados referentes a um moinho em funcionamento na Finlândia tendo realizado um conjunto de medições ao longo de dois períodos distintos de tempo, separados por cerca de oito meses, com cerca de três semanas cada um. Durante cada um desses períodos de três semanas, os autores contabilizaram em cada caso a carga e o correspondente valor do enchimento. Apresentam sob forma gráfica os resultados obtidos para a relação carga - enchimento através da localização de cada ponto obtido sem, contudo, ensaiarem o ajustamento de qualquer relação, nomeadamente polinomial, para os valores obtidos e assim representados. A observação de ambos os gráficos leva a pensar no ajustamento de uma curva de forma parabólica com concavidade voltada para baixo.

Os autores apresentam uma descrição exaustiva das acções que tiveram que realizar com vista à obtenção dos pontos carga - enchimento. Há que referir dois aspectos importantes:

- a carga apresenta uma variação oscilante ao longo do período referente a uma revolução do moinho, para um dado enchimento; esta variação é cíclica e está directamente relacionada com o número de forras transversais do moinho, que atingem uma altura superior às outras, como, aliás, os autores descrevem.

- cada valor da carga considerado é obtido a partir do cálculo de uma média horária.

Com base nos valores apresentados por Miettunen *et al* (1993), e partindo do princípio que os moinhos apenas diferiam no tamanho, procedeu-se ao cálculo de uma relação semelhante para o moinho secundário de PA.

Antes do mais, refira-se que, de um ponto de vista físico, não faria qualquer sentido considerar como possibilidade a aproximação por uma curva que não fosse do tipo polinomial e, de entre estas, que possuísse um grau superior a dois. Isto porque a relação carga - enchimento dependerá,

essencialmente, de factores como a inércia da massa movida e as forças de atrito em jogo. A inércia variará com o quadrado da massa e a força de atrito variará linearmente com a massa, ou seja, com o enchimento, pois massa e enchimento diferem um do outro apenas de um factor constante.

Face aos pressupostos anteriores, decidiu-se proceder à aproximação da relação carga - enchimento por uma curva do 2º grau.

Contudo, e em termos meramente dimensionais, a aproximação poder-se-ia fazer por polinómios de grau superior porque haveria sempre a possibilidade de divisão por factores lineares ou quadráticos, por exemplo, representativos de médias de valores da massa ou do enchimento. Pensamos, porém, que esse não será o caminho mais correcto.

É de referir também que, infelizmente, em Miettunen *et al* (1993) não se faz qualquer referência às dimensões do moinho que serviu de base ao seu estudo pelo que, por esse caminho, não se poderia tirar qualquer relação entre os parâmetros equivalentes dos dois moinhos.

Para a obtenção das relações carga - enchimento que a seguir são referidas recorreu-se ao programa BMDP 5R de regressão polinomial referido em BMDP (1992).

Começou-se por verificar se o ajustamento referente ao moinho referido por Miettunen no seu trabalho já citado correspondia, como a observação dos gráficos deixava entender, a uma parábola com concavidade voltada para baixo. Seleccionaram-se dez observações cuja representação não deixava lugar a quaisquer dúvidas, de modo a, pelo menos, eliminar ou diminuir drasticamente os erros de observação, e chegou-se efectivamente a um resultado representativo de uma curva daquele tipo.

Para relacionar as cargas dos dois moinhos e, assim, poder obter uma relação entre a carga e o enchimento para o moinho PA procuraram-se pontos representativos de situações particulares. Esses pontos estão caracterizados na tabela 3.1.

Situação	Enchimento (%)	Carga (kW)	Carga (kW)
		Miettunen	PA
Nominal	.45	390	1515
Carga máxima	.50	430	1800
Enchimento mínimo observado	.30	225	730
Enchimento máximo observado	.65	310	1200

Situações particulares paralelas observadas
nos moinhos PA e de Miettunen
Tabela 3.1

Os valores das cargas representados na tabela 3.1 conduziram a

$$P = 0.00125 p^2 + 4.12 p - 231 \quad (3.1)$$

como relação entre as cargas dos dois moinhos e em que

P - carga do moinho secundário PA

p - carga do moinho estudado por Miettunen *et al*

Como quatro pontos apenas poderia ser pouco para que se obtivesse uma relação suficientemente fiável, foram solicitados a PA mais alguns pontos (ver Anexo IV) para que a expressão 3.1 pudesse, ao menos, ter alguma validade. Foram assim obtidos mais seis pontos que, embora não obtidos nas melhores condições, conduziram a:

$$P = 0.00125p^2 + 4.05p - 210 \quad (3.1a)$$

A expressão 3.1a não difere muito de 3.1 e não conduz a resultados substancialmente diferentes. Como os 4 pontos da tabela 3.1 são perfeitamente seguros do ponto de vista prático, optou-se pela utilização da expressão 3.1. A hipótese alternativa seria a aproximação linear que, embora próxima como se vê, não tem correspondência física para todos os fenómenos; optou-se, assim, pela aproximação quadrática.

No Anexo IV podem ser consultadas as duas listagens que reproduzem a obtenção das expressões 3.1 e 3.1a.

Introduzindo 3.1 foi possível obter, recorrendo novamente ao programa BMDP 5R, os valores da carga do moinho secundário correspondentes aos valores de enchimento e carga retirados de Miettunen *et al* (1993) e que conduzem a valores coerentes com os esperados e com os que se tinham observado para as situações particulares.

Mas, para verificar os efeitos do enchimento na fiabilidade do moinho, houve que obter valores deste parâmetro para tratamento directo, conforme se verá em 3.4.2.

Com os valores da carga do moinho secundário correspondentes aos diversos valores do enchimento, foi possível, então, relacionar estas duas variáveis, obtendo-se:

$$E = .505 \pm \sqrt{.0814 - .000044P} \quad (3.2)$$

em que E representa o enchimento.

Há, assim, que fazer o tratamento do enchimento de forma separada consoante estejamos perante percentagens de enchimento superiores ou inferiores a meio volume do moinho.

3.3.3 - Formas de consideração das variáveis

Nesta secção serão descritas as formas segundo as quais se explicitaram as variáveis consideradas relevantes para a fiabilidade do moinho com vista à utilização do programa 2L da BMDP. Iremos, assim, considerar separadamente a carga e o enchimento, o nível vibratório e os pontos de medida, o alinhamento e o estado da observação para além, como é óbvio, da variável definidora do tempo de sobrevivência. Abordar-se-á também a independência das variáveis. A finalizar será apresentado o conjunto das variáveis na sua globalidade.

3.3.3.1 - Carga e enchimento como variáveis

A carga entrou no modelo como variável contínua medida em kW (a carga representa a potência absorvida pelo moinho). O enchimento foi também

considerado como variável contínua, medida em percentagem do volume total do moinho ocupado pela suspensão de minério em água.

Simplesmente, e de acordo com o referido em 3.3.2, o enchimento é definido a partir da carga segundo a equação 3.2. Veremos em 3.4.2 como se obtiveram os resultados relativos à influência destas duas variáveis bem assim como a consideração de resultados a partir de hipotéticas variações do enchimento para uma mesma carga.

A variável representativa da carga foi designada por "pot" no modelo.

3.3.3.2 - Nível vibratório e pontos de medida

O nível vibratório foi considerado no modelo através de uma variável discreta de acordo com o já definido em 3.2.2.2. Explicitando melhor, se a observação foi interrompida devido a observação do nível vibratório superior a 7 mm/s, a variável discreta "vib", definidora do nível vibratório, tomou o valor 1; caso contrário, foi-lhe atribuído o valor 0.

Torna-se necessário explicitar as razões que levam à utilização da velocidade do movimento vibratório aferida através do recurso a acelerómetros. Se a utilização de acelerómetros já foi devidamente justificada em 3.2.2.2 e em 3.3.1, impõem-se algumas considerações sobre o recurso à velocidade como parâmetro definidor do movimento vibratório.

Com efeito, a velocidade é o indicador mais equilibrado, nomeadamente para frequências entre 10 e 1000 Hz. É, por isso, o mais recomendado pelas normas, conforme se refere em ISO (1974) que o escolhe como medida de referência para a intensidade vibratória. É também esta norma ISO, com o número 2372, que apresenta os valores dos níveis globais de vibração recomendados, em termos de valor eficaz, em velocidade, para quatro classes distintas de máquinas, e na gama de frequências compreendida entre 10 e 1000 Hz. É aí que se pode encontrar o valor de 7.1 m/s como nível de alarme para uma máquina do tipo do moinho que serviu de base a este trabalho.

Wowk (1991) refere a velocidade como uma boa escolha para a medição de vibrações da generalidade das máquinas entre 10 e várias centenas de

Hertz. A velocidade representa um compromisso entre a ênfase dada às baixas frequências pelas medições caracterizadas pelo deslocamento provocado pelo movimento vibratório e a ênfase dada às altas frequências pelas medições em que a aceleração da vibração é o parâmetro caracterizador. Com efeito, a velocidade é o deslocamento multiplicado pela frequência e a aceleração é o mesmo deslocamento multiplicado pelo quadrado da frequência.

Mas, conforme se pode ver em 3.2.3, foram medidos valores da vibração em seis pontos diferentes que estão representados na figura 3.4. Ora, desses seis pontos, só três apresentaram níveis vibratórios significativos, ou seja, com um número de medições superiores a 7 mm/s em, pelo menos, dois casos. E, de entre esses, isso apenas acontecia quando as medições se realizavam segundo a direcção axial. Ora, como a paragem do equipamento é determinada apenas pelo nível vibratório, independentemente da direcção segundo o qual esse nível é obtido, foi apenas a direcção axial que foi considerada não tendo sido, por isso, necessário incluir no modelo uma variável definidora da direcção segundo a qual as medições foram obtidas.

Os três pontos que se revelaram de algum modo significativos foram os pontos designados na figura 3.3 como 2, 3 e 4. Para a caracterização destes pontos recorreu-se à utilização de duas covariáveis discretas mudas (ver 2.8), segundo o esquema representado na tabela 3.2.

	DP1	DP2
Ponto 2	0	0
Ponto 3	1	0
Ponto 4	0	1

Esquema de utilização de covariáveis mudas
para definição dos pontos de medida do nível vibratório

Tabela 3.2

Na tabela 3.2, as designações DP1 e DP2 referem-se às duas covariáveis mudas consideradas.

Outro aspecto relacionado com o tratamento destas variáveis é o da sua independência relativa. Embora a independência entre as variáveis não seja relevante para a utilização do modelo dos riscos proporcionais, é importante aferi-la para se ter uma compreensão melhor do funcionamento

da máquina. Testou-se, assim, a independência do nível vibratório em relação à carga do moinho e ao ponto de medida.

O programa utilizado para o teste de independência entre variáveis encontra-se explicitado no anexo V.

Como é óbvio, só faria sentido testar variáveis em relação às quais pudessem subsistir quaisquer dúvidas sob este aspecto. Assim, é evidente que não existe relação entre a carga e o ponto de medida ou o facto de ter havido alinhamento prévio e que essa mesma relação existe entre esse mesmo alinhamento prévio e o nível vibratório.

Utilizando o programa incluído no anexo V, obtiveram-se os resultados seguintes para o teste de independência dos parâmetros carga (pot) - amplitude de vibração (vib) e ponto de medida - amplitude de vibração. Os resultados encontram-se indicados na tabela 3.4 e mostram-nos, como já se suspeitava, a dependência entre a carga do moinho e a amplitude de vibração e, embora num grau um pouco menor, entre o ponto de medida e a amplitude de vibração. As tabelas 3.3 a) e 3.3 b) indicam-nos os dados de partida e explicitam-nos também a forma de utilização do programa incluído no anexo V.

níveis de carga	nº de casos com vel. de vib. menor que 7 mm/s	nº de casos com vel. de vib maior ou igual a 7 mm/s
até 1000	0	6
entre 1000 e 1500	0	4
maior que 1500	5	5

a) Distribuição dos casos observados
em função da carga e da vibração

	nº de casos com vel. de vib. menor que 7 mm/s	nº de casos com vel. de vib. maior ou igual a 7 mm/s
ponto 2	1	4
ponto 3	4	4
ponto 4	0	7

b) distribuição dos casos observados
em função do ponto de medida e da vibração

Tabela 3.3

	valor- <i>p</i>
carga vs. vibração	.035
ponto vs. vibração	.078

Resultados do teste à independência
dos pares carga-vibração e ponto-vibração

Tabela 3.4

Para ambos os casos se considerou que p não era suficientemente elevado pois não ultrapassava .1, valor que foi considerado a barreira para que se pudesse considerar, sem margem para dúvidas, que os parâmetros considerados eram independentes entre si e, por isso, tomado como nível de significância. O teste foi efectuado tomando como base a distribuição qui-quadrado.

3.3.3.3 - Alinhamento

Conforme já se referiu em 3.2.3, foi tida em linha de conta a situação em que se encontrava o moinho, para cada um dos casos observados, em relação ao alinhamento. Considerou-se, então, uma variável de tipo discreto, incluída no modelo como covariável, designada por AL, e que tomou o valor 1, sempre que a paragem do moinho devido a falha era a primeira que se observava após um realinhamento, e o valor 0, no caso contrário. Esta situação teve em conta o facto de, pelo menos teoricamente, o realinhamento ir permitir baixar o nível vibratório. O facto de, por vezes, o realinhamento conduzir a situações piores que as registadas anteriormente está relacionado também com o facto de estas observações terem sido levadas a cabo numa situação de arranque e teste

do equipamento que tinha sido instalado, no que a este parâmetro diz respeito, de uma forma anómala.

A tabela 3.5 resume a situação em relação à variável AL.

	AL
1ª observação após alinhamento	1
outra situação	0

Definição da covariável AL

Tabela 3.5

3.3.3.4 - Estado da observação

A utilização da rotina 2L da BMDP impõe, para cada caso considerado, a indicação do estado da observação realizada em relação à sua inclusão no modelo. Por estado da observação deve entender-se a situação de censura ou de não censura tendo em vista os fins a que a mesma se destine. Como já se definiu, para a aplicação deste modelo, cada caso é definido a partir de uma interrupção do funcionamento do moinho devido a avaria. São avarias todas as situações que reflectam um funcionamento defeituoso dos órgãos mecânicos do conjunto (porque só se estão a tratar os aspectos mecânicos).

As falhas típicas são as referentes ao nível de vibração elevado, ao desgaste das forras e à falta de lubrificação. Nesta fase do funcionamento não faz sentido considerar como típicos quaisquer outros tipos de falhas que, aliás, não se registaram. As faltas de lubrificação, atendendo à vigilância dos operadores e do serviço de manutenção, também não se deveriam registar e, efectivamente, assim sucedeu. Ficaram, então, como modos de avaria, o nível de vibração e a substituição das forras.

A paragem do moinho devido a substituição das forras teve lugar, durante o período em que decorreram as observações que deram origem aos casos que foram incluídos na base de dados para a rotina 2L, apenas por três vezes. Todos os outros casos foram paragens devidas a níveis vibratórios elevados.

Os dois modos de avaria foram considerados separadamente. Contudo, devido ao número muito reduzido de casos, não foi possível fazer

convergir o modelo dos riscos proporcionais para o modo de avaria relacionado com o desgaste das forras pelo que só o modo referente ao nível de vibração foi considerado.

A variável definidora do estado da observação é, na rotina 2L, designada por "reject". Assim, para a aplicação do modelo dos riscos proporcionais ao moinho secundário, a variável "reject" tomou o valor 1 nos casos em que a interrupção do funcionamento do moinho se ficou a dever a níveis de vibração elevados e tomou o valor 0 nos casos em que a interrupção se ficou a dever a substituição das forras e nos casos em que a observação foi interrompida sem que tivesse havido paragem do moinho. Como é óbvio, quando se tentou testar o modelo para o modo referente às forras a variável "reject" tomou valores contrários aos referidos acima, ou seja, 1 para paragens devidas a forras e 0 nos outros casos.

A tabela 3.6 resume a situação em relação à variável "reject".

	reject
paragens devidas a níveis elevados de vibração	1
outros casos	0

Definição da variável definidora do estado da observação

Tabela 3.6

3.3.3.5 - Tempo de sobrevivência

A variável definidora do tempo de sobrevivência é uma variável contínua que representa a diferença, expressa em dias, entre a data de uma paragem do moinho devida a avaria e a data da paragem anterior também devida a avaria. Na rotina 2L esta variável é designada por "survival".

A diferença acima referida é calculada a partir das datas, sem indicação horária porque não existia, em que as ocorrências relevantes tiveram lugar e, por isso, houve lugar à ocorrência de muitos tempos empatados entre si, de acordo com o referido em 2.4. Para desempatar esses tempos e eliminar, assim, algumas dificuldades que se pudessem criar em relação à convergência do modelo, somaram-se aos diferentes tempos ligados

números aleatórios de ordem de grandeza com vezes inferior aos valores dos tempos de sobrevivência. Todos os tempos de sobrevivência ficaram, assim, diferentes tendo deixado de existir tempos empatados.

3.3.3.6 - Resumo global de variáveis

A tabela 3.7 apresenta um resumo das variáveis consideradas para aplicação do modelo dos riscos proporcionais, para analisar a sobrevivência em relação ao modo de avaria definido pelo nível de vibração, ao moinho autógeno secundário de Pirites Alentejanas.

Variável	Tipo	Valor\unidade	Observações
survival	contínua	dias	tempo de sobrevivência
reject	discreta	vib causa de paragem 1 outros 0	estado da observação
carga	contínua	kW	potência consumida; covariável
vib	discreta	≥7 1 <7 0	nível vibratório; covariável
DP1	discreta	ponto 2 0 ponto 3 1 ponto 4 0	covariável muda
DP2	discreta	ponto 2 0 ponto 3 0 ponto 4 1	covariável muda
AL	discreta	1º obs após alinhamento 1 outros 0	alinhamento; covariável
percent	contínua	%	enchimento; covariável

Resumo da definição das variáveis
Tabela 3.7

Na tabela 3.8 apresentam-se os dados obtidos distribuídos de acordo com as variáveis anteriormente definidas.

Variáveis	Gamas de valores	Nº de casos
reject	0	4
	1	19
pot	até 1000	7
	1000 a 1500	4
	> 1500	11
	s/ valor	1
vib	0	8
	1	15
DP1	0	14
	1	9
DP2	0	14
	1	9
AL	0	19
	1	4
	total	23

Distribuição dos dados segundo as variáveis e respectivas gamas de valores

Tabela 3.8

3.4 - Resultados obtidos

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação do modelo dos riscos proporcionais aos dados apresentados em 3.3. Os resultados aqui apresentados aparecem como o produto de um conjunto de situações estudadas que diferem umas das outras pelos valores das diferentes variáveis consideradas.

Os resultados são apresentados divididos de acordo com o nível vibratório e a carga do moinho. Incluem-se nesta última divisão os resultados obtidos quando se entrou em linha de conta com o enchimento do moinho.

A apresentação dos resultados será precedida, para cada caso, de uma breve explicação sobre os factores que basearam as escolhas feitas com vista à apresentação de um determinado caso em detrimento de outros. No final serão discutidos os resultados apresentados.

3.4.1 - Nível vibratório

O nível vibratório é caracterizado pela variável discreta vib e os resultados obtidos expressam a seguinte situação para o coeficiente de regressão referente a vib e $Z=1$:

$$\beta = 1.2558$$

$$e^{\beta} = 3.5105$$

Os valores acima encontrados reflectem a importância que a variável vib tem na função de risco, ou seja, se num dado momento, o nível vibratório, em qualquer dos pontos de medida, ultrapassar o nível de alarme, a probabilidade de o moinho vir a parar devido a avaria é cerca de três vezes e meia superior ao que seria se o nível vibratório não tiver ultrapassado o nível de alarme, para o mesmo ponto de medida.

Foi verificada a relevância desta variável para o modelo através da realização de testes de significância. Esta variável nunca foi considerada como não relevante para o modelo tendo-se obtido sempre valores p inferiores ao nível de defeito (.15) logo a partir do momento em que a variável entra no modelo.

Na igualdade de todas as outras variáveis verificou-se o comportamento relativo da função de sobrevivência para os dois valores diferentes da variável definidora do nível vibratório. Esse resultado é expresso através do gráfico da figura 3.4, obtido para as duas situações referidas na tabela 3.9. Aqueles valores foram escolhidos porque:

- a influência da vibração faz-se sentir do mesmo modo para qualquer carga
- o ponto 4 é o ponto mais próximo da fonte vibratória
- a situação de não alinhamento prévio é a mais comum

situação	pot	vib	DP1	DP2	AL
1	1500	0	0	1	0
2	1500	0	0	1	0

Situações consideradas para caracterizar o efeito da vibração

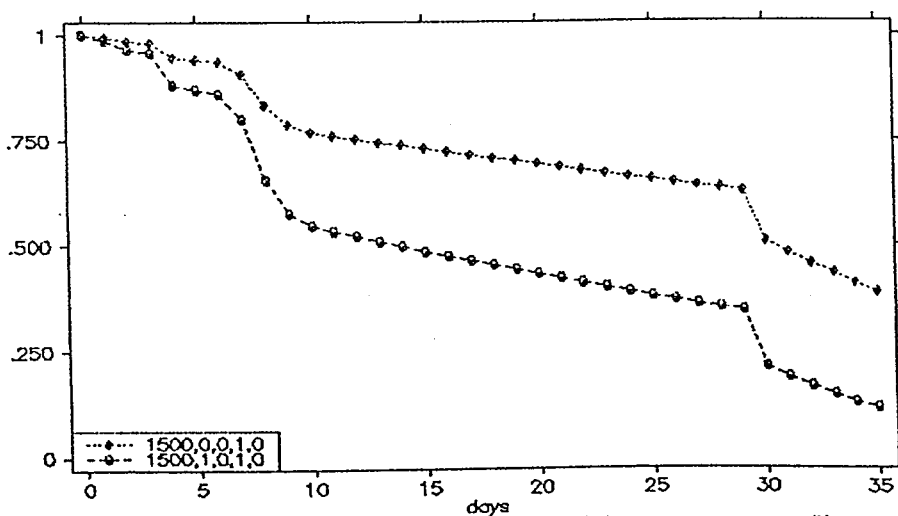
Tabela 3.9

Outra situação caracterizada por este modelo na sua aplicação ao moinho secundário é a de existência de realinhamento na paragem anterior. O realinhamento, se bem efectuado, deveria conduzir a uma melhoria das condições de funcionamento do moinho. Com efeito, obtiveram-se os seguintes valores:

$$\beta = -.743$$

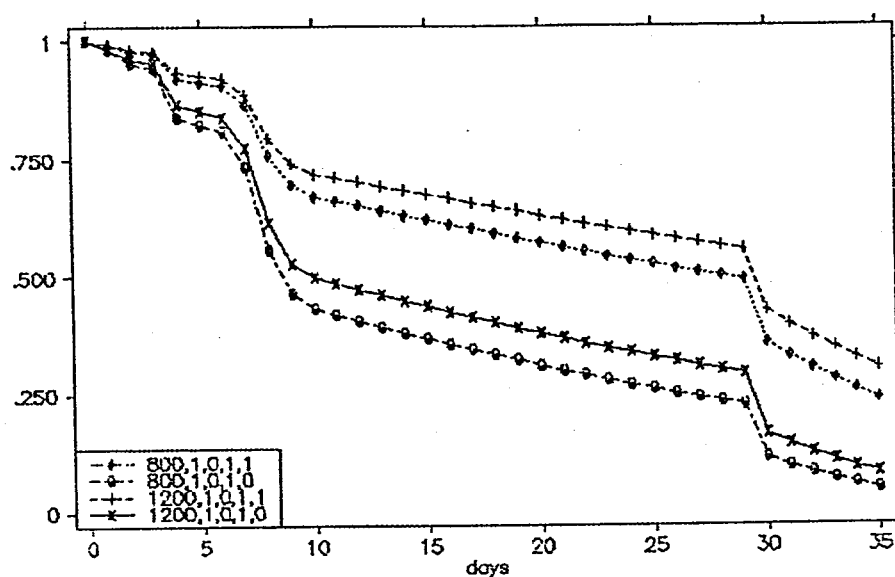
$$e^{\beta} = .476$$

A figura 3.5 apresenta os resultados gráficos que permitem visualizar o efeito do alinhamento no funcionamento do moinho. Mais uma vez, a carga não se mostra relevante na forma pela qual se faz sentir o efeito do realinhamento. A figura 3.5 apresenta, contudo, 4 situações, equivalentes duas a duas, que representam o efeito do alinhamento para duas cargas diferentes. Aqui considerou-se que a situação que mais importaria caracterizar seria aquela em que o nível vibratório já apresentasse valores acima do valor de alarme. A tabela 3.10 apresenta as situações consideradas.



Efeito do nível vibratório no funcionamento do moinho

Figura 3.4



Efeito do alinhamento no funcionamento do moinho
Figura 3.5

Nas figuras anteriores e nas que se seguem do mesmo tipo, os gráficos apresentados têm em ordenadas a fiabilidade do equipamento. Para as legendas deverão ter-se em atenção as tabelas que figuram ao longo do texto com vista à identificação das variáveis, cujos valores aparecem nas legendas das figuras sempre referidos pela ordem pot, vib, DP1, DP2 e AL.

situação	pot	vib	DP1	DP2	AL
1	800	1	0	1	1
2	800	1	0	1	0
3	1200	1	0	1	1
4	1200	1	0	1	0

Situações consideradas para caracterizar o alinhamento
Tabela 3.10

No que se refere ao nível vibratório, há que considerar ainda o ponto de medida. Como caracterizadores do ponto de medida existem nesta aplicação do modelo as covariáveis mudas DP1 e DP2. Foram obtidos os seguintes resultados:

a) DP1

$$\beta = 0.389$$

$$e^{\beta} = 1.4754$$

b) DP2

$$\beta = -1.923$$

$$e^{\beta} = 0.146$$

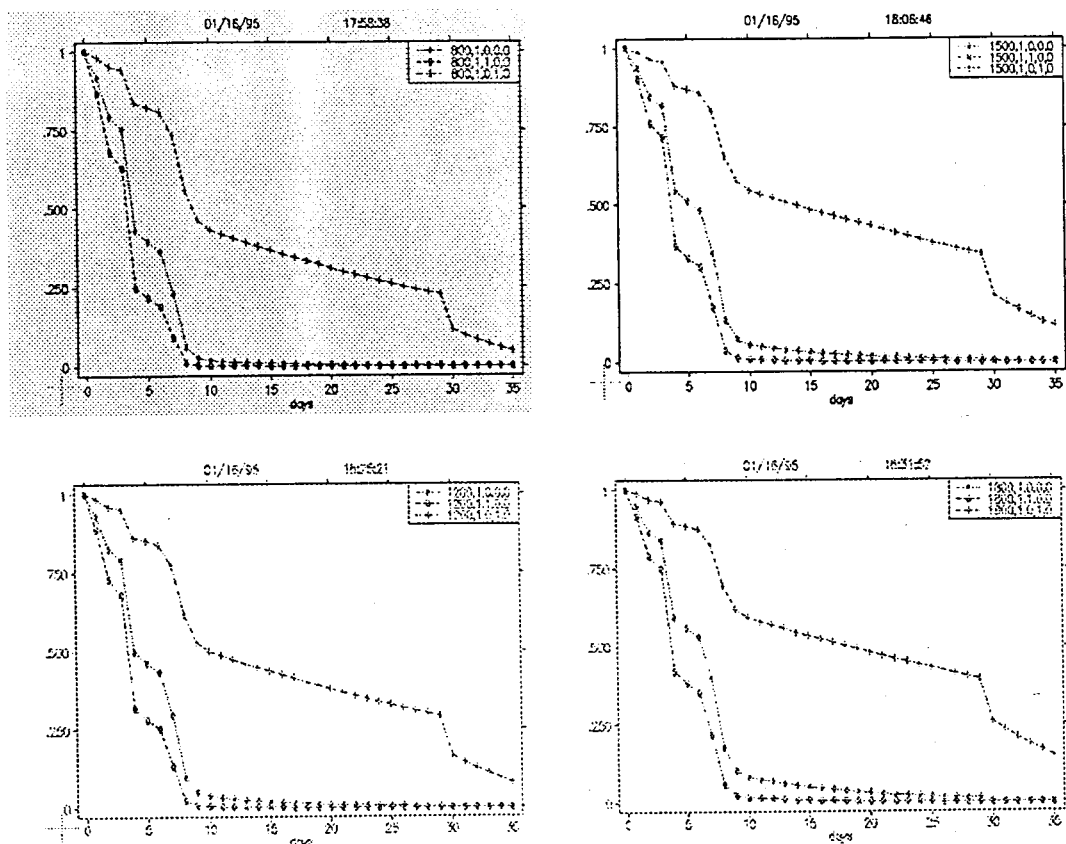
As situações consideradas estão caracterizadas na tabela 3.11 sendo, mais uma vez, de realçar o efeito quase inexistente da carga. Foram testadas doze situações, equivalentes quatro a quatro, ou seja, foram testados os pontos de medida para os quatro níveis significativos de carga já referidos em 3.3.2.. Em relação às outras covariáveis mantêm-se as considerações já feitas acima.

situação	pot	vib	DP1	DP2	AL
1	800	1	0	0	0
2	800	1	1	0	0
3	800	1	0	1	0
4	1200	1	0	0	0
5	1200	1	1	0	0
6	1200	1	0	1	0
7	1500	1	0	0	0
8	1500	1	1	0	0
9	1500	1	0	1	0
10	1800	1	0	0	0
11	1800	1	1	0	0
12	1800	1	0	1	0

Situações consideradas para a caracterização dos pontos de medida
Tabela 3.11

Na figura 3.6 a), b), c) e d) podem visualizar-se as situações caracterizadas na tabela 3.11.

Para uma melhor visualização destas figuras deverá consultar-se o anexo VI.



Efeito dos pontos de medida no funcionamento do moinho
 Figura 3.6

As variáveis vib e DP2 são as únicas que o modelo reconhece como estatisticamente significativas após o teste de eliminação por regressão inversa. A tabela 3.12 apresenta os coeficientes do modelo final referentes a estas duas variáveis.

covariável	coeficiente	e^{β}	valor p	teste χ^2
DP2	-1.72	.179	.041	4.181
vib	1.21	3.345	.013	8.722

Valores relativos às variáveis estatisticamente significativas
 Tabela 3.12

3.4.2 - Carga

Os resultados obtidos em relação à carga têm que ser encarados também tendo em vista o enchimento como variável relacionada com a carga. Ir-se-á, assim, apresentar estes resultados em três etapas. Na primeira não se entrará no modelo com a consideração do enchimento como covariável. Na segunda far-se-á a introdução do enchimento e, na terceira, só se considerará o enchimento, não se entrando, por isso, em linha de conta com a carga.

Como a variável representativa da carga não foi reconhecida como estatisticamente significativa, não foi realizado o teste de significância parcial a cada um dos ramos definidores do enchimento visto que estas duas variáveis estão directamente relacionadas entre si.

A covariável carga apresenta os seguintes resultados:

$$\beta = -0.0006$$

$$e^{\beta} = 0.9994$$

quando testada num modelo que ainda não contempla o enchimento do moinho.

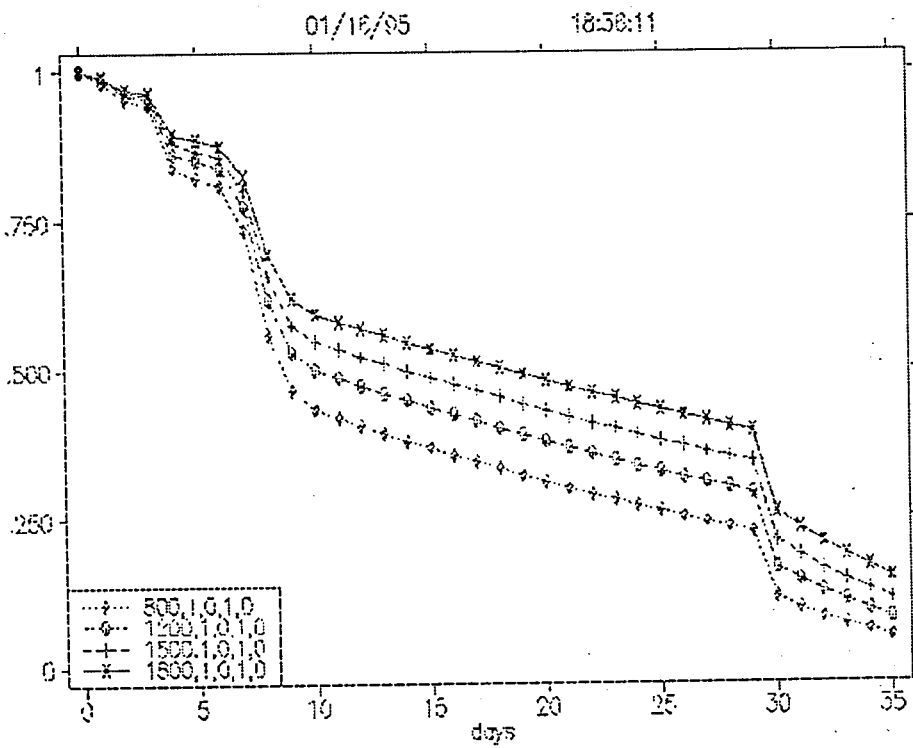
Podemos verificar a influência da variável carga (pot) através da observação gráfica da função de sobrevivência em função do tempo (figuras 3.7 e 3.8).

Foram testadas as quatro cargas típicas já referidas anteriormente para as situações de realinhamento prévio e de não realinhamento na observação anterior mas para a situação de medição acima do nível de alarme verificada no ponto em que mais facilmente essa situação se pode atingir (ponto 4).

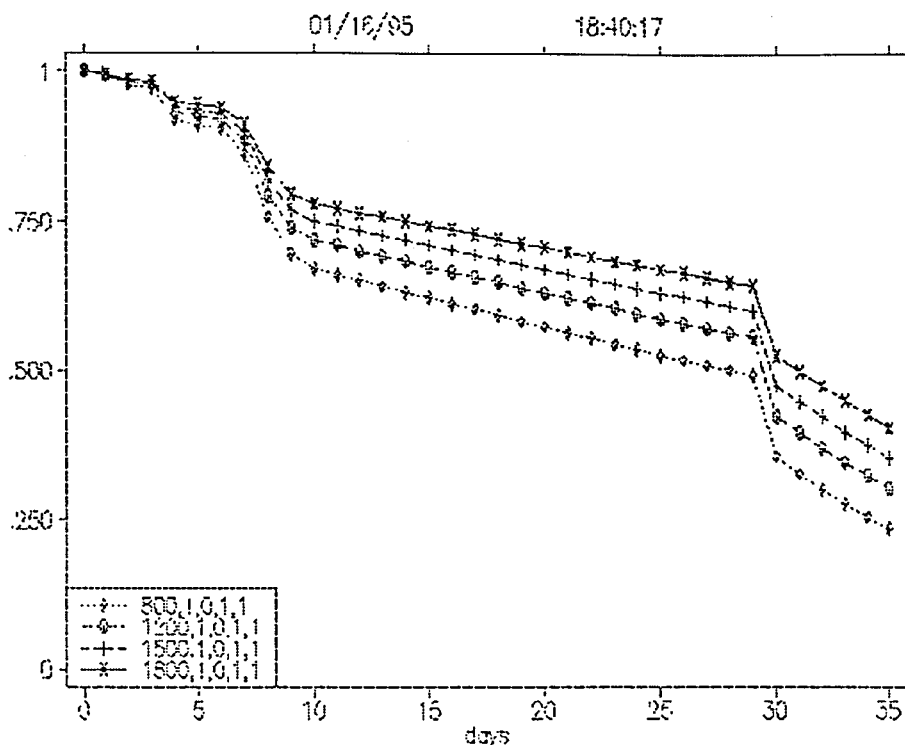
A tabela 3.13 representa as situações referidas cujos resultados se apresentam sob forma gráfica nas figuras 3.9 e 3.10.

situação	pot	vib	DP1	DP2	AL
1	800	1	0	1	0
2	1200	1	0	1	0
3	1500	1	0	1	0
4	1800	1	0	1	0
5	800	1	0	1	1
6	1200	1	0	1	1
7	1500	1	0	1	1
8	1800	1	0	1	1

Situações representadas para a caracterização da carga
Tabela 3.13



Efeito da carga no funcionamento do moinho em situação de não
existência de pré realinhamento
Figura 3.7



Efeito da carga no funcionamento do moinho em situação de pré
realinhamento
Figura 3.8

Conforme se referiu, foi testado também o efeito do enchimento no funcionamento do moinho. O enchimento está intimamente relacionado com a carga, de acordo com o que se descreveu em 3.3.2 e com a expressão 3.2. Como a expressão 3.2 tem dois ramos, pois, para a mesma carga, é possível funcionar com dois valores de enchimento, o modelo foi testado para duas situações diferentes, para cada um dos níveis de carga considerados, uma, correspondente a um enchimento acima daquele para o qual é necessário funcionar com a potência máxima e, outra, correspondente a um enchimento abaixo do enchimento correspondente à potência máxima.

Assim, correspondendo a potência máxima ao enchimento de 50.5 % do volume total do moinho, foram testados mais dois níveis de carga de entre os que já anteriormente foram definidos. A tabela 3.14 apresenta as situações assim representadas mas, todas elas, correspondentes a situações que respeitam as relações entre as variáveis representativas da carga (pot) e do enchimento (percent).

situação	pot	vib	DP1	DP2	AL	percent
1	800	1	0	1	0	0.720
2	1200	1	0	1	0	0.674
3	1850	1	0	1	0	0.505
4	1200	1	0	1	0	0.336
5	800	1	0	1	0	0.290

Situações representadas para a caracterização da carga e do enchimento
Tabela 3.14

Os efeitos comparados das situações 1, 2 e 3 na função de sobrevivência do moinho estão representados graficamente na figura 3.9. Na figura 3.10 apresentam-se os efeitos na mesma função comparando-se, agora a situação 3 com as situações 4 e 5.

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos para a aplicação do modelo utilizando cada um dos ramos da função definidora do enchimento em função da carga do moinho.

a) Para o 1º ramo

$$PERCENT = .505 + \sqrt{.0814 - .000044POT}$$

$$\beta_{POT} = .0005$$

$$e^{\beta_{POT}} = 1.0005$$

$$\beta_{PERCENT} = 5.32$$

$$e^{\beta_{PERCENT}} = 204.62$$

b) Para o 2º ramo

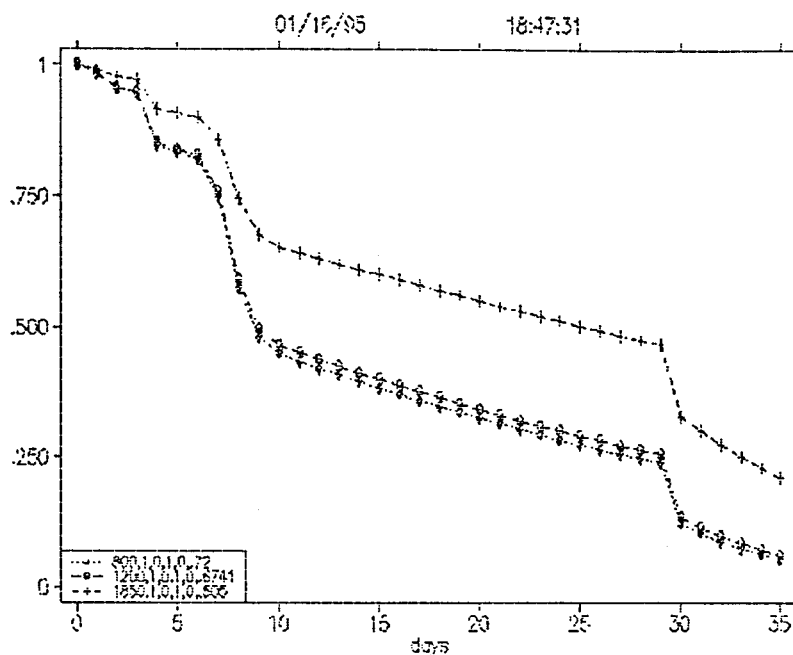
$$PERCENT = 0.505 - \sqrt{0.0814 - 0.000044POT}$$

$$\beta_{POT} = 0.0005$$

$$e^{\beta_{POT}} = 1.0005$$

$$\beta_{PERCENT} = -5.32$$

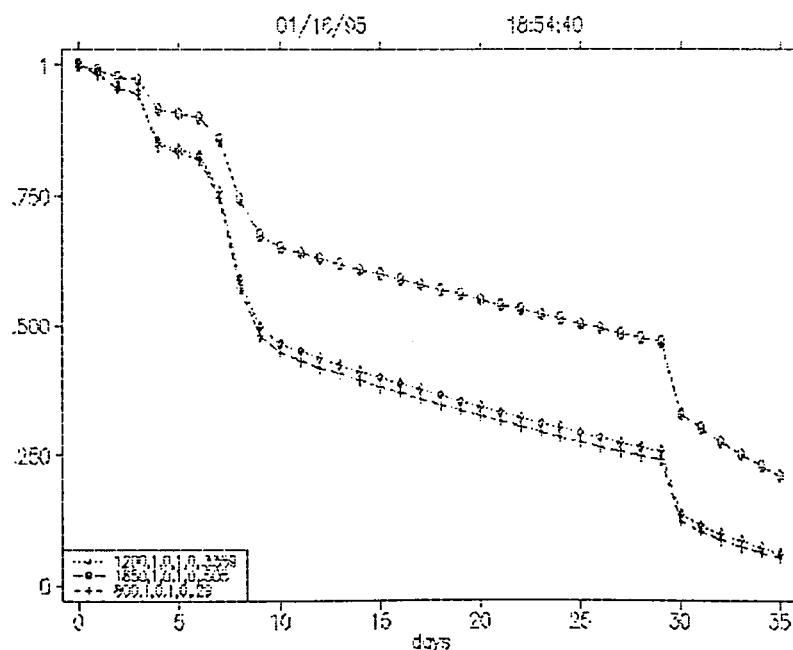
$$e^{\beta_{PERCENT}} = 0.0049$$



Efeito da carga e do enchimento no funcionamento do moinho

1º ramo

Figura 3.9



Efeito da carga e do enchimento no funcionamento do moinho

2º ramo

Figura 3.10

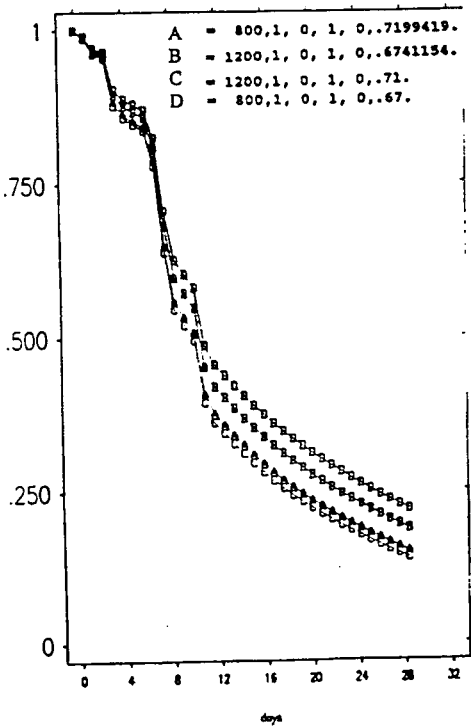
As situações caracterizadas a seguir representam hipóteses de funcionamento do moinho em que os níveis de enchimento

correspondentes a situações fora daquela que corresponde à potência máxima, embora dentro dos limites estabelecidos por cada um dos ramos da função que relaciona o enchimento com a potência, se afastam dos valores que se obteriam utilizando de forma exacta aquelas expressões.

Essas situações estão representadas na tabela 3.15, para cada um dos ramos, e, na figura 3.11, a título de exemplo, procede-se à sua representação gráfica para o 2º ramo.

situação	pot	vib	DP1	DP2	AL	percent
1	800	1	0	1	0	.67
2	800	1	0	1	0	.44
3	1200	1	0	1	0	.71
4	1200	1	0	1	0	.44

Situações representadas para a caracterização da carga e do enchimento por comparação com as situações directamente relacionadas
Tabela 3.15



Efeito da carga e do enchimento no funcionamento do moinho para valores fora do padrão directo (2º ramo)
Figura 3.11

Finalmente, verificaram-se os resultados que se obteriam ensaiando um modelo em que a carga não funcionasse como covariável, sendo substituída pelo enchimento.

As situações consideradas têm em conta também ambos os ramos da função definida pela expressão 3.2 à qual se continuou a recorrer para a definição dos valores de enchimento para cada um dos casos constantes da amostra que serviu de base ao estudo.

A tabela 3.16 representa as situações caracterizadas e a figura 3.12 mostra de forma gráfica os resultados obtidos para a função de risco específica de cada uma das situações escolhidas para caracterizar o modelo obtido nestas circunstâncias. Note-se que a figura 3.12 diz respeito às situações referentes aos dois ramos da curva representativa do enchimento com a situação referente ao 1º ramo representada em cima e a do 2º ramo em baixo. Na tabela 3.16 encontram-se definidas também quais as situações que respeitam a cada um dos ramos.

situação	vib	DP1	DP2	AL	percent	ramo
1	1	0	1	0	0.335	1
2	1	0	1	0	0.440	1
3	1	0	1	0	0.505	1
4	1	0	1	0	0.290	1
5	1	0	1	0	0.400	1
6	1	0	1	0	0.710	2
7	1	0	1	0	0.670	2
8	1	0	1	0	0.500	2

Efeito do enchimento no funcionamento do moinho

Tabela 3.16

Finalmente, apresentam-se os resultados referentes ao modelo inicial que considera o enchimento como covariável em alternativa à carga.

Assim:

a) 1º ramo

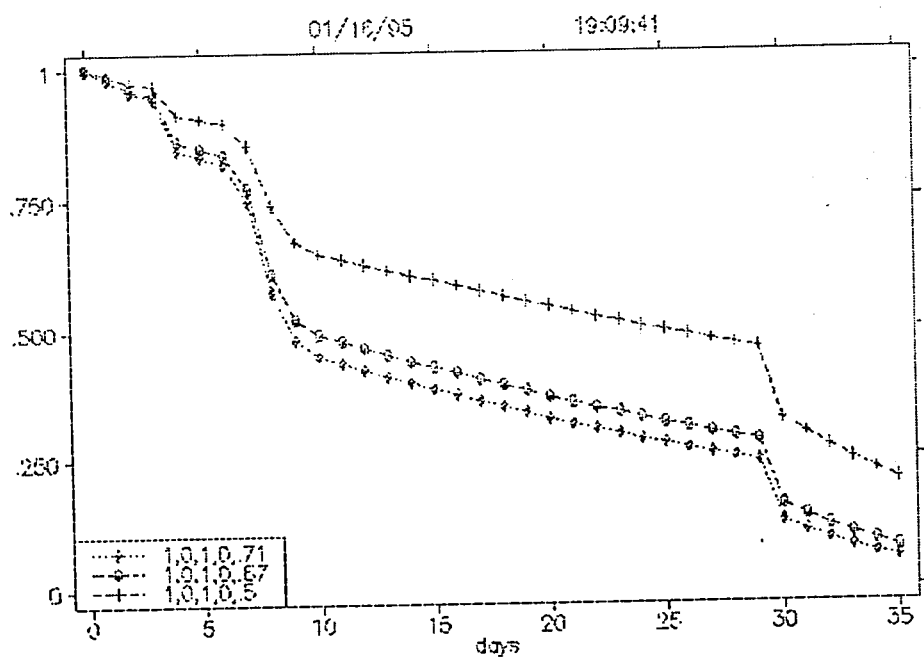
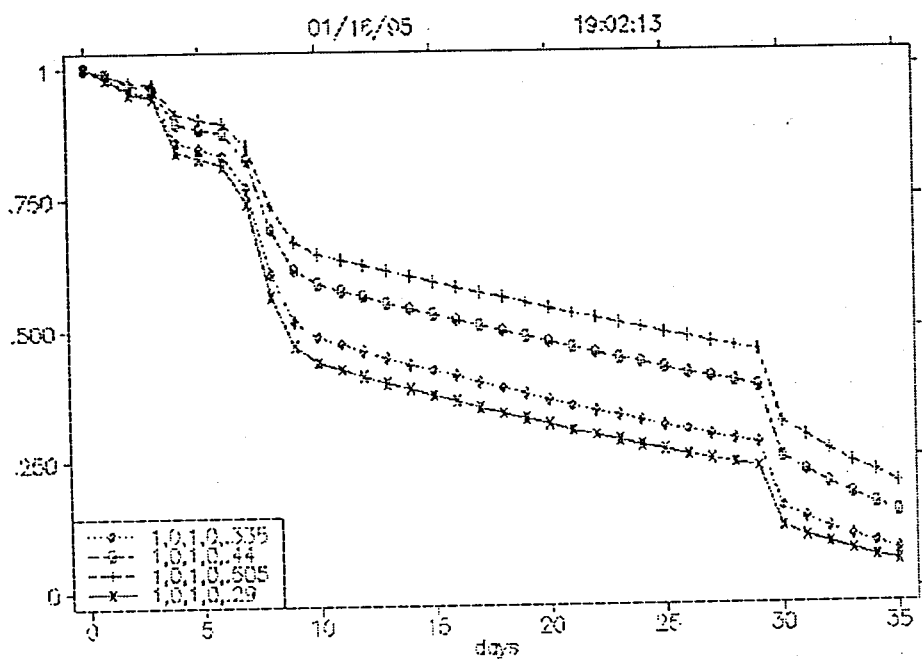
$$\beta_{\text{percent}} = -2.8924$$

$$e^{\beta_{\text{percent}}} = .0554$$

b) 2º ramo

$$\beta_{\text{percent}} = 2.8924$$

$$e^{\beta_{\text{percent}}} = 18.0362$$



Efeito do enchimento no funcionamento do moinho
1º ramo em cima e 2º ramo em baixo

Figura 3.12

3.4.3 - Aspectos gerais

Nesta secção ir-se-ão apresentar resultados de âmbito geral; consideram-se incluídos aqui os resultados respeitantes à função de sobrevivência e à função de risco base.

Assim, nas tabelas 3.17 e 3.18 apresentam-se os factores através dos quais se relaciona a função de sobrevivência base com as funções de sobrevivência específicas de algumas das situações caracterizadas anteriormente. Tais factores devem ser entendidos como expoentes a aplicar ao valor da função de fiabilidade (sobrevivência) base para, para um dado tempo de sobrevivência, reproduzir a função de sobrevivência específica do padrão em causa, de acordo com o que se expôs em 2.6 - expressão 2.29.

As relações entre as funções de risco e de sobrevivência são expressas através das expressões 1.12 e 2.28 e 2.29, dando a expressão 2.26 a relação entre as funções de risco e de risco acumulado. Note-se que a rotina 2L apresenta os valores calculados da função de risco acumulado para todos os pontos da amostra.

A tabela 3.17 apresenta os expoentes referentes ao modelo que não considera o enchimento como covariável e a tabela 3.18 já entra em linha de conta com esse parâmetro.

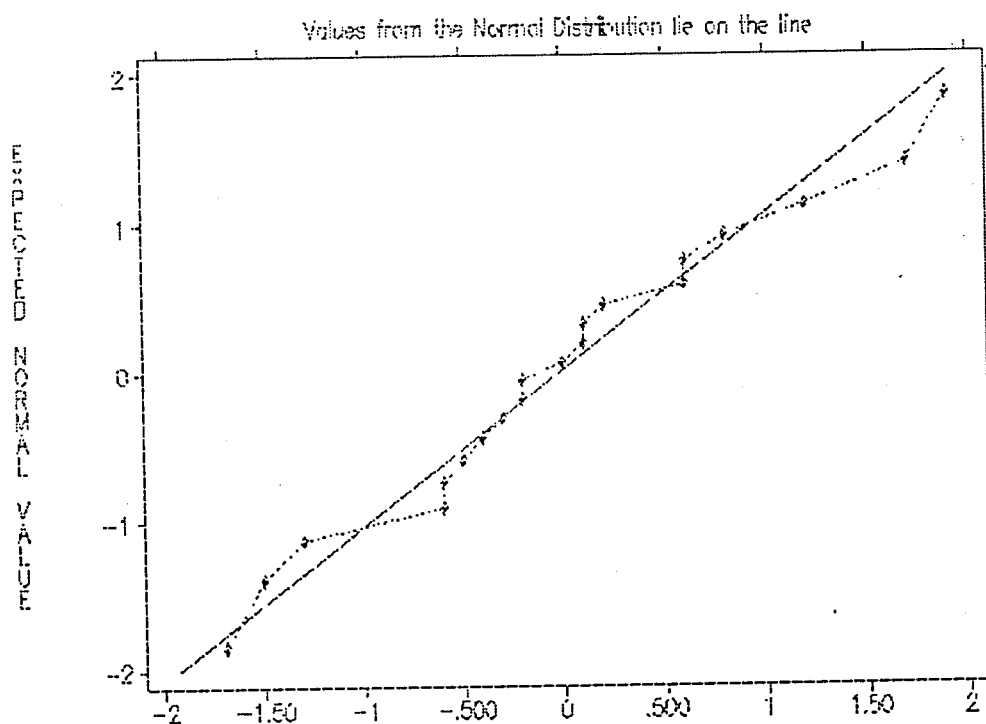
pot	vib	DP1	DP2	AL	expoente	obs
800	1	0	1	1	0.257	
1200	1	0	1	1	0.213	
1500	0	0	1	0	0.106	+2 casos
1500	1	0	1	0	0.373	+2 casos
800	1	0	0	0	2.564	
1800	1	1	0	0	2.641	

Conversão para vários padrões
Tabela 3.17

pot	vib	DP1	DP2	AL	percent	ramo	expoente
1200	1	0	1	0	0.336	1	0.491
1200	1	0	1	0	0.710	2	0.567
800	1	0	1	0	0.290	1	0.515
800	1	0	1	0	0.720	2	0.515
1200	1	0	1	0	0.674	2	0.491
1850	1	0	1	0	0.505		0.274

Conversão para vários padrões incluindo enchimento
Tabela 3.18

Na figura 3.13 representam-se graficamente os resíduos comparativamente com os valores que se obteriam se seguissem uma lei de probabilidade normal. Este gráfico foi obtido a partir dos resultados fornecidos pela rotina 2L para os resíduos de Cox-Snell.



Resíduos de Cox-Snell
Figura 3.13

3.5 - Análise dos resultados

Nesta secção procede-se à análise dos resultados obtidos na perspectiva de comparação entre os resultados obtidos e as condições de funcionamento do moinho em termos de engenharia, ou seja, parte-se dos resultados obtidos para confirmação das condições de funcionamento.

Assim, procede-se à análise da influência de cada um dos parâmetros considerados como covariáveis na taxa de risco do moinho e das razões que conduzem a esses resultados.

Antes do mais, convem referir o resultado referente à significância estatística das variáveis. Com efeito, o modelo foi testado pelo método da razão de verosimilhança, disponível na subrotina 2L, que parece estar mais explorado e analisado que o método PHH que, embora também disponível, não parece estar ainda completamente desenvolvido e analisado teoricamente. Este teste ao modelo utilizado revelou como estatisticamente significativas apenas as covariáveis vib, definidora do nível vibratório, e DP2, covariável muda utilizada para a definição dos pontos de medida das vibrações.

Este resultado revela, no que à variável DP2 respeita, que, quanto ao ponto de medida, se torna significativo apenas o facto de se estar a medir ou não no ponto mais próximo da fonte vibratória. Com efeito, a variável DP2 toma o valor 0 se o ponto de medida não for esse ponto (ponto 4 da figura 3.3) ou o valor 1 se dele se tratar, tal como aparece definido na tabela 3.2.

Quanto à variável vib seria de esperar que fosse estatisticamente significativa visto que acaba por ser a variável definidora dos casos considerados para estudo visto que é o nível vibratório que, nos casos não censurados, acaba por determinar a paragem do moinho.

As variáveis definidoras da carga e da pré-existência de alinhamento acabam por não ser significativas do ponto de vista estatístico face aos dados disponíveis mas, como se irá analisar de seguida, os resultados obtidos com a utilização do modelo em que estas variáveis se incluem

estão de acordo com o que a experiência de condução do moinho levaria a esperar.

Começando a análise pela covariável vib, verifica-se que a sua influência no modelo se faz sentir através de um coeficiente de cerca de 1.21 no modelo completo e de cerca de 1.256 no modelo que contempla apenas as duas variáveis estatisticamente significativas. Quer isto dizer que, se num dado momento se verificar que o nível vibratório é superior ao nível considerado de alarme, a taxa de risco do moinho é cerca de 3.5 vezes superior que no caso contrário. É, realmente, um resultado importante que vem revelar o que a experiência já anteriormente fizera pressentir, ou seja, que o nível vibratório é o parâmetro determinante para a aferição do bom funcionamento do moinho.

A figura 3.4 apresenta um exemplo da influência da variável definidora do nível vibratório na função de sobrevivência onde se pode verificar de forma nítida o efeito deste parâmetro na função de sobrevivência do moinho. Note-se, a este respeito, que a rotina 2L fornece os coeficientes que, para cada padrão definido, permitem passar da função de sobrevivência específica desse padrão para a função de sobrevivência base em cada ponto.

Associada à medição do nível vibratório encontra-se a variável que indica se a observação é ou não a primeira após alinhamento. Embora esta variável não tenha sido considerada estatisticamente significativa, note-se que o resultado obtido no modelo completo mostra uma influência positiva deste parâmetro, ou seja, se tiver havido realinhamento prévio a taxa de risco do moinho baixa para cerca de metade o que acaba por confirmar a vantagem do moinho se encontrar alinhado. A figura 3.5 acaba por mostrar isso para duas cargas diferentes, 800 e 1200 kW, respectivamente, tornando nítida a influência do alinhamento ao permitir verificar que as duas curvas que representam situações com alinhamento prévio estão bem acima das outras duas que representam situações sem alinhamento prévio; nestas últimas, a probabilidade de sobrevivência após alinhamento é bem superior às outras, sem alinhamento.

Outro parâmetro considerado foi o ponto de medida; com efeito, não é indiferente que a medição se faça num ou noutro ponto pois, como parece óbvio, a existência de uma situação de alarme será tanto mais importante quanto mais longe da fonte vibratória se encontrar o ponto de medida.

Nesta situação verifica-se que o modelo apenas reconhece como estatisticamente significativa a medição no ponto mais próximo da fonte vibratória ou noutro ponto que não esse. Antes de mais, note-se que o coeficiente associado ao ponto 4, através da variável DP2, varia entre -1.6 e -1.7, consoante se esteja no modelo completo ou no modelo que apenas entre em linha de conta com as variáveis consideradas estatisticamente significativas.

Aqueles coeficientes indicam-nos que a taxa de risco resultante para o moinho da observação de uma situação de alarme é cerca de cinco vezes menor se aquela tiver sido registada no ponto 4, mais próximo da fonte vibratória, ou num dos outros pontos considerados. Esta situação é facilmente constatóvel através da observação dos exemplos retratados nas figuras 3.6 a), b), c) e d), em que as curvas referentes aos casos em que a medição respeita ao ponto 4 aparecem nitidamente acima das outras, mostrando, assim, que a probabilidade de sobrevivência é, para estes casos e para um mesmo período de tempo, superior à das outras situações.

De modo diferente terá que ser encarado o resultado referente à covariável muda DP1. Para além de não ter sido considerada estatisticamente significativa, o coeficiente obtido de 0.5 poderá reflectir a tendência contraditória da influência do ponto 3 por comparação com os pontos 2 e 4. Com efeito, a medição no ponto 3 seria menos penalizadora que a medição no ponto 2, por este se encontrar mais afastado da fonte vibratória pelo que, por este lado, o coeficiente deveria ser negativo, mas, se for tomado em conta o ponto 4, a medição no ponto 3 seria mais penalizadora pelo que o coeficiente deveria ser positivo. O facto de o coeficiente, embora menor que 1, ser positivo, vem apenas mostrar a forte influência do ponto 4 por comparação com os pontos 2 e 3. Mais uma vez se faz notar que para aferição da localização relativa dos pontos se deve consultar a figura 3.3.

No que parece ser o resultado que mais longe se encontra do que a experiência poderia fazer esperar, note-se a pouca influência que a carga do moinho, ou seja, a potência requerida para o seu funcionamento, tem no funcionamento do mesmo tendo em conta, pelo menos, os dados de que se dispunha. Assim, verifica-se que a carga pouco ou nada influencia na taxa de risco do moinho, conforme se pode aferir do coeficiente obtido, cerca de zero, e das situações representadas nas figuras 3.7 e 3.8. Repare-se, contudo, que a influência da potência na taxa de risco não pode, como

acontecida com as variáveis anteriores, ser contabilizada apenas à custa daquele coeficiente. Neste caso, e porque se trata de uma variável contínua, há que ter em conta também o valor dessa mesma variável. Verificar-se-á assim uma ligeira influência positiva da potência no funcionamento do moinho. Mas, para além destas considerações, esta variável foi tida pelo modelo, face aos dados disponíveis, como não significativa em termos estatísticos.

Indissociavelmente ligada à potência encontra-se, em termos de funcionamento do moinho, uma outra variável, o enchimento. Esta variável, para a qual não foi possível obter valores medidos directamente, teve, contudo, que ser tratada em dois ramos de forma separada, consoante se estava abaixo ou acima da potência máxima. Esta situação deve-se à forma como a potência e o enchimento do moinho se relacionam entre si e, em termos físicos, tem essencialmente a ver com o facto de, a partir de um determinado nível de enchimento a inércia do conjunto se sobrepor ao binário a vencer.

O enchimento tem, no 1º ramo, ou seja, até se atingir a potência máxima, uma influência positiva no funcionamento do moinho mas o seu estudo pode ser levado a efeito tendo em conta valores estritamente dependentes da potência debitada, de acordo com os dados disponíveis, ou supondo que se podem proceder a variações do enchimento para uma mesma potência partindo, por exemplo, da possibilidade de variação da velocidade de rotação do conjunto. Em ambos os casos verifica-se uma forte influência do enchimento que é tanto maior quanto maior for a potência em causa, conforme se pode observar na figura 3.11.

Também neste caso não se deve perder de vista que o enchimento é uma variável contínua e que a sua influência na taxa de risco se faz não só através do coeficiente obtido através do recurso à rotina 2L mas também através do valor da própria variável.

Já no que diz respeito ao 2º ramo a situação se inverte passando o aumento do enchimento a traduzir-se numa deterioração das condições do moinho, conforme também se pode observar na figura 3.11 à direita.

Duas observações se podem retirar da análise destes resultados: a primeira que, confirmando as expectativas dos utilizadores, e não obstante a relativa insuficiência dos dados disponíveis, o enchimento tem uma

influência superior à da potência no funcionamento do moinho; a segunda, que o modelo não confirma suficientemente devido ao tipo de dados de que se dispõe ou que apenas confirmará tendo em atenção os efeitos multiplicativos maiores que valores superiores do enchimento têm na função de risco, a de que a deterioração das condições de funcionamento com o aumento do enchimento no 2º ramo deverá ser ainda mais gravosa devido ao fenómeno do embalamento que tenderá a fazer saltar os dentes da engrenagem transmissora do movimento.

Resultados semelhantes são obtidos quando se utiliza um modelo que apenas contenha como covariável produtiva o enchimento, não entrando, pois, em linha de conta com a potência. Neste caso o efeito do enchimento não aparece de forma tão notória mas é ainda determinante e segue os mesmos padrões que nos casos anteriores, como se pode verificar através da observação da figura 3.12.

3.6 - Conclusões

Neste capítulo descreveu-se a aplicação do modelo dos riscos proporcionais a um equipamento mecânico de grande porte entrando em linha de conta com covariáveis definidoras de parâmetros de condição e covariáveis definidoras de parâmetros de funcionamento do equipamento. O equipamento estudado é um moinho autogéneo de pirite com uma potência de 1500 kW para as condições nominais de funcionamento correspondentes a um enchimento de 50 %.

Como parâmetros de funcionamento foram utilizados a carga e o enchimento definidos através das covariáveis *pot* e *percent*, respectivamente. Como parâmetros de condição foram definidos o nível vibratório e o alinhamento, ou melhor, a existência ou não de alinhamento prévio em relação a uma dada observação, definidos pelas covariáveis *vib* e *AL*, respectivamente.

Os dados foram obtidos através de medições directas realizadas expressamente para controlo da condição do moinho, como foi o caso do nível vibratório, recorrendo ao histórico do equipamento, como se passou com o alinhamento ou através dos dados fornecidos pela produção para o caso da covariável de funcionamento obtida directamente, a carga do

moinho, definida através da covariável pot. A covariável percent, definidora do enchimento do moinho, foi obtida de modo indirecto recorrendo aos dados obtidos para um outro moinho, de forma semelhante ao moinho em estudo, e aos poucos dados existentes para este último e caracterizadores de situações equivalentes.

Cada caso foi definido através das paragens verificadas no funcionamento do moinho. A maioria dessas paragens foi determinada pela ocorrência de um nível vibratório superior ao nível considerado como de alarme sendo considerados censurados os casos em que a paragem foi determinada por outros motivos. Entre esses motivos, para além da última observação, interrompida sem que o moinho tivesse parado, surgiu como relevante a substituição das chamadas forras de borracha existentes no interior do moinho. Lamentavelmente, a escassez de dados referentes a esta última situação impediu que o modelo tivesse testado também este problema pois o método não convergiu com os dados existentes, dada a sua escassez.

Em relação às covariáveis utilizadas, refira-se que apenas a carga e o enchimento foram definidas através de variáveis contínuas, recorrendo-se ao uso de covariáveis discretas para o nível vibratório e o alinhamento. Ainda como covariáveis discretas foram utilizadas duas covariáveis mudas, definidoras dos pontos de medição. Com efeito, o nível vibratório foi aferido recorrendo-se à medição em seis pontos distintos mas desses seis apenas três apresentavam resultados significativos, ou seja, um número de situações razoável em que o nível de alarme tivesse sido ultrapassado, pelo que apenas esses foram considerados.

Podendo o nível vibratório ser contabilizado por recurso ao deslocamento, à velocidade ou à aceleração do movimento vibratório, há que referir que a medição se efectuou recorrendo à utilização de um acelerómetro de voltagem ligado a um analisador espectral, por facilidade de utilização, por precisão na medida e porque era na altura o equipamento disponível, mas, atendendo a que a velocidade aparece como o indicador mais adequado, esses valores foram depois convertidos em valores de velocidade.

Aparecendo o desalinhamento como o principal factor causador de vibração, decidiu-se pela sua inclusão no modelo. Outros factores condicionantes do bom estado de funcionamento do moinho não foram considerados por nunca terem sido observados.

O alinhamento considerado nesta fase deve ser encarado como uma tentativa de obter as condições de funcionamento ideais para o moinho que, à partida, não existiam visto que o moinho arrancou desalinhado.

O modelo dos riscos proporcionais apresentava à partida a vantagem de poder ser utilizado sem recurso inicial a qualquer distribuição padronizada, que, aliás, neste caso seria bastante difícil de obter de forma fiável, atendendo ao número limitado dos dados existentes.

Os resultados obtidos vieram confirmar as expectativas existentes no que se refere às variáveis de condição, a saber:

- o nível vibratório tem uma influência extremamente negativa no estado do moinho;
- a existência de alinhamento prévio melhora as condições de funcionamento;

Confirmaram-se ainda as expectativas no que se refere à influência do enchimento no funcionamento do moinho que tem uma influência positiva antes de se atingir a potência máxima e uma influência negativa para lá desse ponto devido ao fenómeno de embalamamento.

O modelo dos riscos proporcionais mostrou também de forma inequívoca a influência do ponto de medida nos resultados obtidos, ou seja, mostrou que a observação de um nível de alarme é tanto mais grave quanto mais longe da fonte vibratória estiver o ponto de medida em que esse nível tiver sido observado. Contudo, e para além disto, face aos dados existentes, o modelo indicou também que, em relação aos pontos de medida, apenas era estatisticamente significativo o facto de a medição ter sido ou não efectuada no ponto mais próximo da fonte de vibração.

De referir a pouca influência que, de acordo com os resultados obtidos, a potência tem no funcionamento do moinho e que acaba por ser o resultado que mais se afasta das expectativas dos utilizadores daquele equipamento.

A rotina 2L fornece os valores da função de risco acumulado base podendo as funções de risco base e a função de sobrevivência ser facilmente obtidas através de derivação e do recurso às expressões 2.28 e 2.29, respectivamente para a função de sobrevivência base ou para um dado padrão. Além disso, são ainda fornecidos os factores através dos

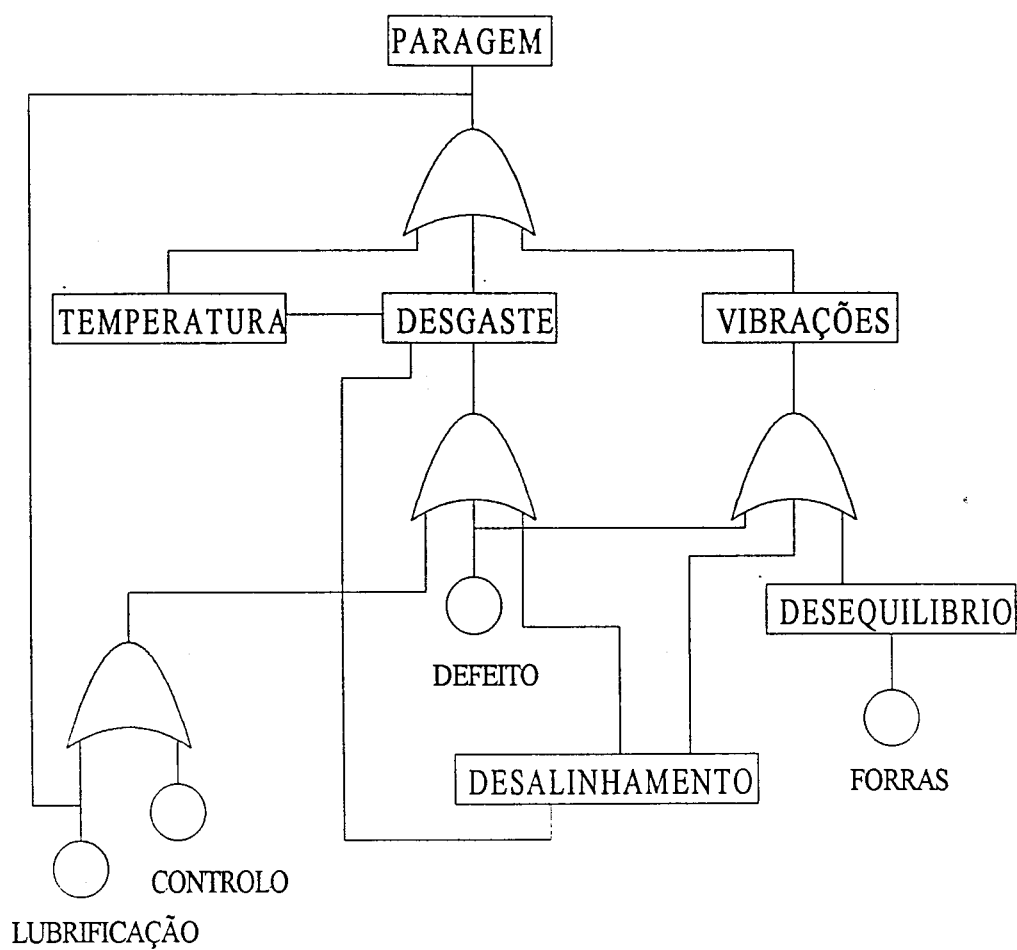
quais se pode passar da função de sobrevivência base para a função de sobrevivência relativa a qualquer dos padrões escolhidos.

Em relação aos resíduos obtidos como forma de teste de adequação do modelo, refira-se que se torna difícil aferir da sua qualidade por não existir um termo de comparação que se possa considerar fiável e que se procedeu à comparação com uma distribuição normal dos resíduos não se afastando estes significativamente da recta de inclinação de 45 graus.

Como nota final, é importante reter o resultado de que, perante a observação de um nível vibratório de alarme no ponto mais próximo da fonte vibratória e sem que tenha havido alinhamento prévio, a manutenção do moinho em funcionamento sem qualquer intervenção correctora não deve ultrapassar os dez dias pois a partir desse ponto a fiabilidade baixa para valores que não garantem o normal funcionamento do equipamento, como aliás se pode observar, por exemplo, e independentemente da carga, na figura 3.5.

A finalizar, apenas uma pequena análise referente aos parâmetros que aqui foram referidos. Foi focado o nível vibratório como resultante de desalinhamento. Contudo, este desalinhamento poderá ter, também ele, outras origens como desgaste excessivo ou órgão defeituoso. Por outro lado, a falta de lubrificação poderá originar excesso de temperatura e, também, desgaste excessivo. Mas é de referir ainda que o próprio desalinhamento vai ele também ocasionar maiores desgastes durante o funcionamento que, por sua vez, vão fazer aumentar ainda mais esse mesmo desalinhamento devido a folgas que vão ficando cada vez maiores. Estas considerações não entram em linha de conta com factores menores e não contabilizados que também interferirão na ocorrência de desalinhamento, como seja, por exemplo, o desequilíbrio provocado por desgaste interno ou por enchimento deficiente.

Face a estes pressupostos apresenta-se a seguir uma versão resumida do que poderá ser uma árvore de falhas para o moinho autogéneo.



Árvore de falhas do moinho
Figura 3.14

4 - Aplicação a máquinas ferramentas

4.1 - Introdução e apresentação

Neste capítulo apresenta-se uma outra situação de aplicação do modelo dos riscos proporcionais ao estudo da fiabilidade de equipamentos tendo em vista a obtenção de previsões quanto ao funcionamento dos mesmos de forma a que se possam de uma forma mais eficaz planear as respectivas intervenções de manutenção.

Para este exemplo o modelo foi aplicado a um conjunto de máquinas-ferramentas existentes e em serviço nas instalações da Renault Portuguesa em Cacia. Trata-se de quatro rectificadoras, duas das quais rectificam eixos que funcionarão como árvores de cames nos motores rectificando as outras duas as superfícies de apoio dos balanceiros que comandam a abertura e fecho das válvulas dos mesmos motores. As máquinas são todas de construção semelhante diferindo apenas no seu funcionamento que obedece a ciclos diferentes de maquinação.

A empresa procede de forma constante ao controlo de qualidade sobre as peças produzidas em cada fase da respectiva produção sendo, neste caso, controlada a rugosidade das superfícies rectificadas em cada uma das situações.

Vai ser apresentado um caso de aplicação do modelo dos riscos proporcionais com a utilização de uma covariável variável no tempo mas, antes de mais, há que referir que, sendo a rugosidade das superfícies rectificadas, nos eixos e nos balanceiros, respectivamente, o parâmetro controlado em termos de qualidade nesta fase, atendendo à operação efectuada pelas máquinas, e sendo as peças produzidas e os ciclos de funcionamento necessariamente diferentes, desde logo se decidiu proceder à divisão dos dados recolhidos em dois subconjuntos diferentes, consoante se tratava de rectificadoras de eixos ou de rectificadoras de balanceiros sendo que apenas para este último caso se aplicou o modelo com a covariável variável no tempo.

Assim, e sucessivamente, neste capítulo proceder-se-á à apresentação do equipamento estudado e das suas características gerais, não esquecendo a caracterização dos parâmetros relevantes para a caracterização de cada situação, posto o que se procederá à apresentação do caso em que não se inclui a covariável com variação no tempo.

Para a apresentação do exemplo em que se aplica o modelo dos riscos proporcionais com uma covariável variável no tempo procede-se a uma apresentação mais detalhada da máquina e do seu ciclo de funcionamento posto o que se passa à caracterização das variáveis envolvidas e à descrição da forma através da qual os seus valores foram obtidos.

No final procede-se à análise dos resultados obtidos e retiram-se as respectivas conclusões.

4.2 - Aplicação sem covariáveis dependentes do tempo

4.2.1 - O equipamento estudado

O princípio de funcionamento e a constituição base das rectificadoras são bastante simples não o sendo já a análise do seu funcionamento devido à complexidade dos ciclos de funcionamento comandados numericamente e à multiplicidade dos equipamentos acessórios envolvidos.

Assim, e basicamente, está-se perante um eixo de suporte que transmite o movimento de um motor eléctrico às mós de rectificação. As peças a rectificar são colocadas na mesa de rectificação que trabalha sob as mós.

Como acessórios existem ainda os motores que fornecem o movimento para os deslocamentos da mesa, para a lubrificação de todo o sistema, para a refrigeração, para a lavagem das peças, para o deslocamento das mós e, ainda, para a chamada diamantagem das mós.

A apresentação das características envolvidas na análise de funcionamento do equipamento far-se-á apenas para a situação em que se aplica o modelo com a covariável variável no tempo, ou seja, para as rectificadoras de balanceiros (ver 4.3), pois para a primeira situação, como só se considerou a rugosidade directamente medida, aquelas características não se tornam directamente relevantes.

Como os modos de avaria considerados também são os mesmos para as duas situações, recomenda-se que a informação sobre estes seja consultada em 4.2.3 e alguma informação complementar sobre o equipamento seja consultada em 4.3.1.

4.2.2 - Recolha de dados fornecidos

Os dados que serviram de base para este primeiro estudo foram integralmente fornecidos pela Renault Portuguesa sendo alvo de posterior tratamento de forma a que pudessem ser introduzidos na base de dados segundo as exigências do modelo e do "software" utilizado.

Foram recolhidos essencialmente dois tipos de dados:

- os dados referentes à paragem das máquinas

O modelo dos riscos proporcionais é um modelo de sobrevivência pelo que há que estabelecer com precisão o tempo de sobrevivência para cada caso constituinte da base de dados; há ainda que definir os motivos pelos quais foi interrompido o funcionamento da máquina. Estes dados foram obtidos a partir das listas de intervenções da manutenção e dos diários de bordo dos operadores de produção (ver 4.2.3).

- os dados referentes à rugosidade

Estes dados foram obtidos a partir das medições realizadas pelo controlo de qualidade.

Há, contudo, algumas considerações que é importante fazer de modo a entender a constituição das diferentes bases de dados. Assim:

- para cada modo de avaria foi considerada uma base diferente visto que se considerou, de acordo com Leitão (1990), que os modos de avaria não deveriam ser incluídos como covariáveis; em cada base são censurados os casos que não se tenham ficado a dever ao respectivo modo de avaria.

- para a rugosidade não se considerou o valor absoluto mas a chamada amplitude da rugosidade, ou seja, a sua variação em relação

ao valor anterior, pois é por este valor que os operadores decidem na prática parar a máquina por produto não conforme e não pelo tecto absoluto. Tratando-se de um modelo de sobrevivência, foi considerado, para cada caso, o valor da covariável no início da contagem do tempo de sobrevivência, ou seja, e porque se está a considerar a amplitude da rugosidade, o valor que consta da base de dados para esta covariável, em cada caso, é o valor da amplitude da rugosidade entre o 1º e 2º dias do tempo de sobrevivência.

Em 4.2.3 e 4.2.4 apresentar-se-ão em pormenor estas situações.

Deve ainda ser referido que, pelo facto de existirem muitos tempos iguais, ou seja, muitos tempos empatados, houve que desfazer esses nós. Para isso recorreu-se à adição, aos tempos ligados, de números aleatórios, previamente gerados, mas, em todos os casos de ordem de grandeza não superior à centésima parte do tempo em causa.

Para a contabilização dos tempos e a respectiva constituição da amostra de casos, recorreu-se aos registos de pedidos recebidos e de intervenções realizadas pelos serviços de manutenção e aos chamados jornais de posto, ou seja, os registos da produção para cada posto de trabalho. De notar que foram contabilizadas como falhas todas as paragens registadas nesses jornais de bordo para efeitos de mudanças de mós ou de afinações de ferramenta, executados como trabalhos de manutenção de nível 1 ou mesmo entendidos como tarefas a cargo da própria produção.

Os valores da rugosidade ou da amplitude foram retirados dos registos dos serviços de qualidade.

A interacção entre os diversos tipos de informação acima referidos levou à construção da amostra que serviu de base ao estudo e que acabou por ser constituída por 66 casos, todos eles constituídos por dados referentes aos anos de 1991, 1992 e 1993 mas com alguns períodos sem informação entre o início e o fim das recolhas.

4.2.3 - Os modos de avaria

A definição dos modos de avaria está intimamente relacionada com os tipos de ocorrência reportados pelos serviços de Manutenção e, ainda,

com as decisões, reportadas nos jornais de posto de trabalho pela Produção, de interrupção da execução por constatação de variações positivas dos valores da rugosidade das peças produzidas.

Note-se que as interrupções de produção, igualmente reportadas, devidas a quaisquer outros tipos de situações e, portanto, completamente independentes da própria máquina, não são aqui consideradas.

As situações devidas a decisões da produção motivadas por diminuição de qualidade das peças produzidas foram incluídas em conjunto com as situações reportadas pela manutenção como devidas à ferramenta; é o caso dos apertos, por exemplo.

Assim, os modos de avaria considerados foram os seguintes:

- modo de avaria 1
Lubrificação
- modo de avaria 2
Óleo de corte
- modo de avaria 3
Água de lavagem
- modo de avaria 4
Ferramenta (apertos e ajustamentos, pressão do sistema hidráulico, cursos, perda de qualidade e substituição)
- modo de avaria 5
Portas

Estes modos de avaria são válidos para ambas as situações estudadas, sem e com covariáveis variáveis no tempo pois as quatro máquinas são perfeitamente semelhantes na sua constituição.

No que respeita ao modo 4, refira-se que as pressões, os apertos e a perda de qualidade podem estar relacionados entre si pois em caso de avaria numa bomba hidráulica, essa mesma bomba demora a voltar a atingir o valor nominal da respectiva pressão. Ora, enquanto isso, o aperto é

deficiente o que provoca problemas na rectificação com aumento na rugosidade das peças maquinadas.

4.2.4 - Covariáveis consideradas

Para o estudo desta situação foram consideradas as seguintes covariáveis cujas designações, nos ficheiros informáticos de dados, entrada e saída, se encontram entre parêntesis:

- rugosidade (ampl)

covariável contínua que reflecte o valor da amplitude da rugosidade definida como a variação em relação ao valor médio anterior.

Unidade de medida: 0.000001 m.

O critério para cálculo da amplitude foi alterado pela Renault durante o período de recolha mas, para este trabalho, foi sempre tomado o critério acima referido.

- máquina (dum)

covariável discreta que define a qual das duas máquinas em presença se refere o caso

Refira-se ainda que constam no modelo como variáveis o tempo de sobrevivência, definido como o tempo de funcionamento entre avarias (surv), UT, conforme definido em 1.2.6, e, ainda, a variável que define a situação de cada caso, censurado ou aceite (reject). A situação de censura (reject = 0) tem em conta a interrupção da observação, a falha por qualquer motivo não relacionado com o estudo (situação que não ocorreu) e, para cada base, a falha devida aos outros modos de avaria, conforme se descreveu em 4.2.2.

Nas tabelas seguintes apresentam-se, de forma geral, os valores recolhidos para cada covariável organizados por classes de frequência.

Variável	gamas de valores	Nº de casos
surv	<7	25
	7 a 14	27
	>14	4
dum	0	30
	1	36
ampl	até 1	37
	1 a 2	13
	>2	16

Eixos - distribuição dos dados
segundo variáveis e gamas de valores
Tabela 4.1

Para a variável "reject" os valores são apresentados em separado na tabela 4.2 porque se procede à distribuição por valores e por modos de avaria. Assim, e nessa tabela, podem-se ler, em coluna, a repartição dos casos por situação, para cada modo de avaria, e, em linha, para cada situação, por modo de avaria.

	1	2	3	4	5
0	56	53	55	33	53
1	10	13	11	33	13

Em coluna - modos de avaria
Em linha - valores de "reject" (0/1)

Distribuição dos números de casos quanto à situação
para cada modo de avaria
Tabela 4.2

4.2.5 - Resultados obtidos

Nesta sub-secção apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação do modelo dos riscos proporcionais às rectificadoras de eixos de acordo com o conjunto de dados apresentados em 4.2.4.

Os resultados são apresentados divididos de acordo com a máquina em causa (0 ou 1) e, para a mesma máquina, tendo em conta a amplitude da rugosidade.

A título de exemplo, ilustram-se, para cada modo de avaria, quatro situações típicas, duas para cada máquina, através da representação gráfica da fiabilidade em função do tempo de sobrevivência. Para este efeito, tomaram-se como valores típicos da rugosidade 0.5 e 2.92. A opção por estes valores resultou da constatação de que a maioria dos casos apresenta valores para a amplitude da rugosidade inferiores a 1 e de haver um número de casos que se consideraram como significativos que registam valores da amplitude da rugosidade superiores a 2, conforme se pode verificar através da observação da tabela 4.1. Assim, tomaram-se como referências os valores 0.5, intermédio entre 0 e 1, e 2.92, média dos valores das amplitudes da rugosidade para os 16 casos que registam valores para aquela covariável superiores a 2.

4.2.5.1 - Máquina

As máquinas são, conforme referido, caracterizadas pela variável muda "dum" tendo sido os seguintes os resultados obtidos para esta variável e para o valor $dum = Z = 1$:

modo	1	2	3	4	5
B	.7209	.3774	.4713	.3089	.3815
$e^{Z\beta}$	2.0562	1.4586	1.6020	1.3619	1.4645

Resultados obtidos de acordo com a máquina
rectificadora de eixos
Tabela 4.3

Os valores da tabela 4.3 reflectem a importância da máquina na função de risco sendo interessante constatar que, embora as máquinas sejam em tudo semelhantes e executem permanentemente e de modo indistinto o mesmo tipo de tarefa, existe um desempenho inferior por parte da máquina caracterizada por "1" em relação à máquina caracterizada por "0", codificadas por Renault, respectivamente, por 1504 e 1509.

Esta diferença no desempenho não sendo significativa, conforme se verá adiante, é interessante porquanto é sistemática visto que se mantem em todos os modos de avaria. De realçar o valor obtido para os modos de avaria 1, por ser o mais elevado, e 4, por ser o mais baixo e, em simultâneo, o mais importante e, por isso mesmo, uma atenuante da importância relativa do factor máquina na função de risco.

4.2.5.2 - Rugosidade

Por razões já referidas em 4.2.2, para consideração da rugosidade considerou-se não exactamente este parâmetro mas, antes, a amplitude da rugosidade, que também se definiu nessa secção.

Os resultados obtidos encontram-se explicitados na tabela 4.4, de acordo com o modo de avaria e para um valor de $\text{ampl} = Z = 1$.

modo	1	2	3	4	5
β	1.7498	2.1938	1.0817	1.7761	2.0678
$e^{Z\beta}$	5.7535	8.9692	2.9498	5.9068	7.9077

Resultados obtidos de acordo com a rugosidade
para as rectificadoras de eixos
Tabela 4.4

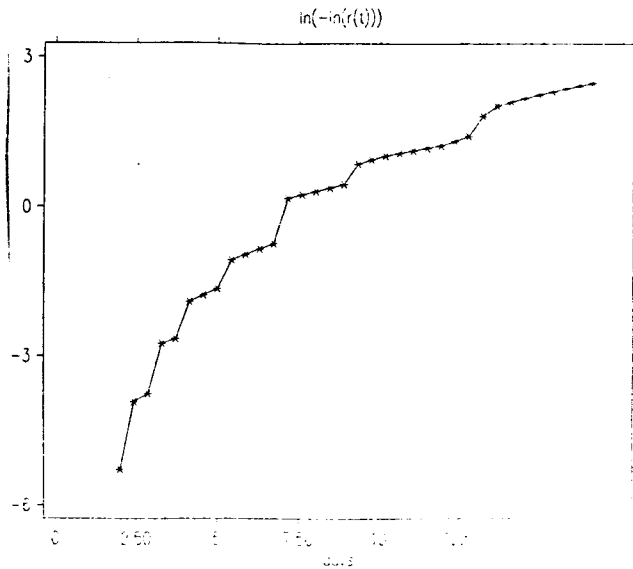
Verifica-se, através da observação destes resultados, um efeito nítido da amplitude da rugosidade na função de risco das rectificadoras ou, se quisermos, no tempo de sobrevivência, pelo que aparece plenamente justificada a opção dos operadores por este tipo de parâmetro (embora este facto deva ser ainda analisado de forma mais detalhada em 4.2.7).

4.2.6 - Resultados globais

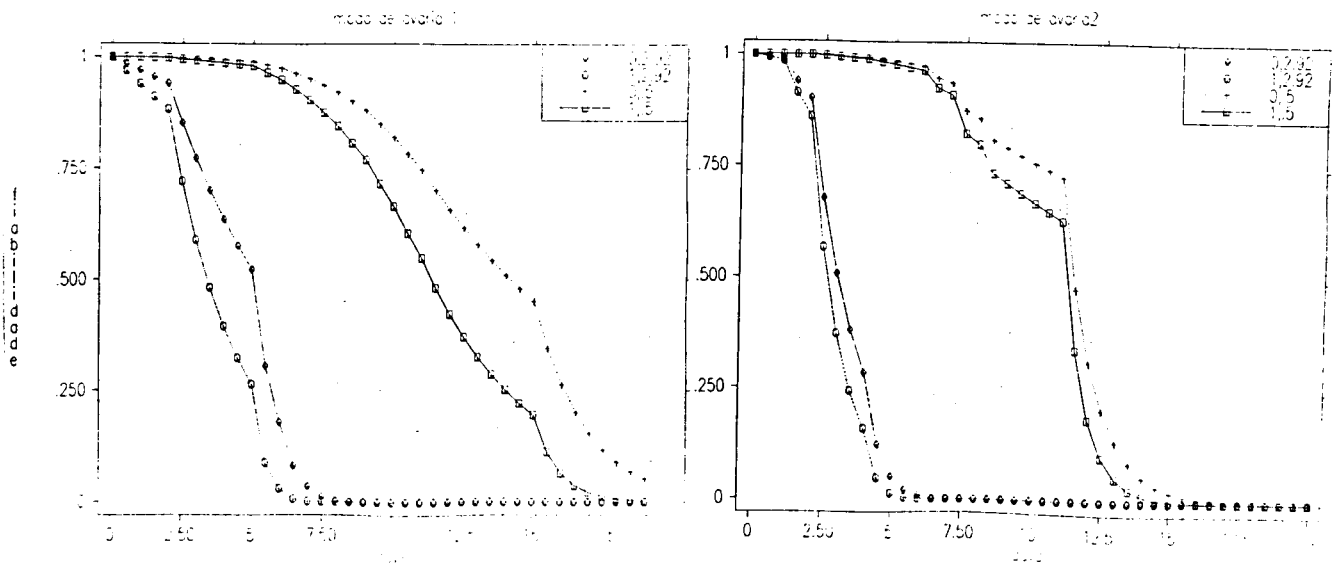
Nas figuras seguintes encontram-se retratados os efeitos das duas covariáveis consideradas na fiabilidade das máquinas rectificadoras de eixos, para os diferentes modos de avaria.

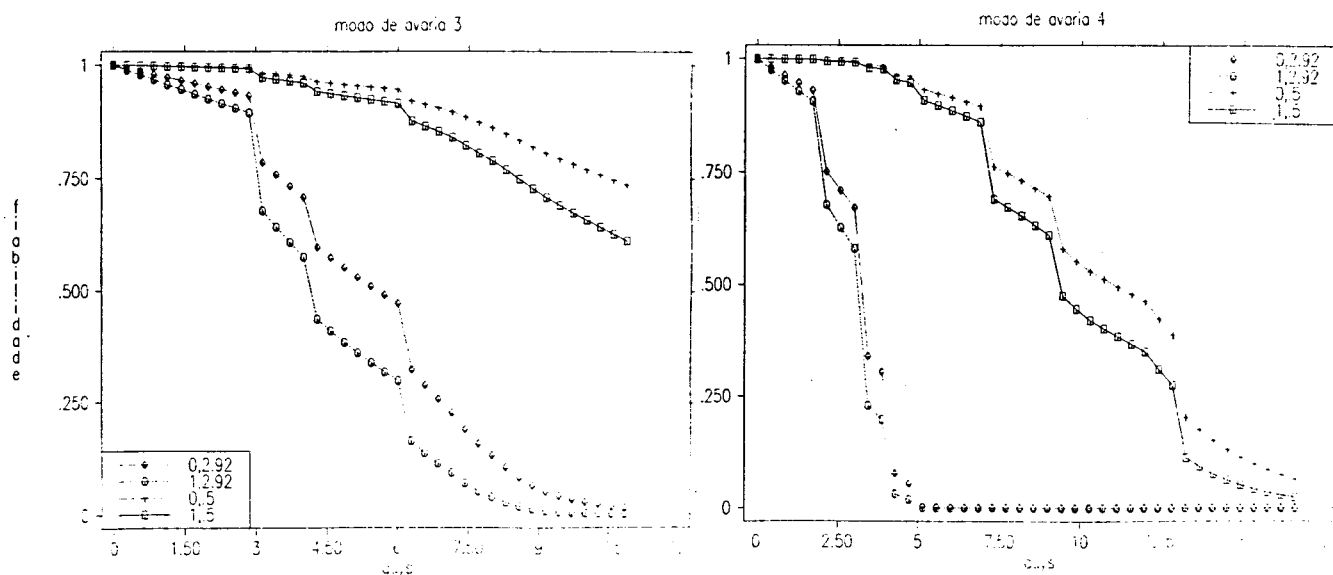
Assim, na figura 4.1 encontra-se representada a função fiabilidade, na forma $\ln(-\ln(r(t)))$, para o modo de avaria 4. Na figura 4.2 representa-se,

então, a função de sobrevivência, ou seja, a fiabilidade das máquinas, para os modos de avaria 1 a 4 e, para cada modo, por máquina (0, 1) e para dois valores considerados característicos da amplitude da rugosidade (.5 e 2.92), conforme referido em 4.2.5.



$\ln(-\ln(r(t)))$ para o modo de avaria 4
 Figura 4.1





Fiabilidade das rectificadoras de eixos por modo de avaria (1 a 4)
Figura 4.2

4.2.7 - Análise dos resultados

Os resultados obtidos podem ser analisados sob vários pontos de vista. Contudo, parece óbvio que a análise se faça de acordo com os parâmetros segundo os quais se decidiu equacionar o problema, a amplitude da rugosidade e a máquina em que o produto foi obtido. Note-se que o modelo dos riscos proporcionais teria permitido a inclusão de outras covariáveis podendo inclusivamente proceder-se a uma análise da relevância estatística dessas mesmas variáveis como, aliás, se fez no capítulo 3 deste mesmo trabalho. Os dados de que se dispunha e a pouca importância que, à partida, lhes era atribuída impediu a consideração dessas variáveis no modelo. Para ilustrar o que ficou dito refira-se, a título de exemplo, que uma dessas variáveis seria o turno de fabrico.

Da observação da figura 4.2 ressalta imediatamente, para qualquer dos modos de avaria, a importância relativa da amplitude da rugosidade por comparação com a rectificadora em causa. Este resultado era de esperar visto que a amplitude da rugosidade é um dos critérios de paragem de qualquer das máquinas.

Com efeito, sempre que um operador decide (já se viu de que modo esta decisão ocorre) interromper a laboração devido a um aumento exagerado da rugosidade das peças maquinadas procede-se de imediato à busca das razões que poderão estar na base dessa ocorrência. Muitas das intervenções realizadas na máquina tiveram essa origem sendo muitos casos solucionados por simples afinação das ferramentas, e considerados incluídos, neste trabalho, no modo de avaria 4, sem intervenção dos serviços de manutenção (trabalhos de nível 1 de manutenção). A sua consideração só foi possível por consulta ao jornal de posto de trabalho facultado pelos serviços da produção.

Referiu-se também em 4.2.5 a justificação da escolha dos operadores por este parâmetro mas é de ter em conta que sendo ele assim determinante e tratando-se o modelo dos riscos proporcionais de um modelo de sobrevivência, tal relação seria de esperar. Assim, se um valor elevado da amplitude faz parar a máquina fica de imediato estabelecida uma relação entre esta variável e o tempo de sobrevivência e o modelo acaba por vir a confirmar a escolha se uma quantidade significativa dos casos constituintes da amostra se tiverem ficado a dever a esta circunstância.

Note-se, porém, que aquela relação não é linear pois o modo 5 de avaria oferece um valor de β para a amplitude de 2.07 e em caso algum se verificou uma paragem do equipamento provocada por observação de amplitude de rugosidade elevada em que se tivesse vindo a concluir que esse excesso de amplitude se teria ficado a dever a causas incluídas no modo 5. Aqui a razão parece ser outra. O que se verificou passar foi que, devido ao facto de se considerarem as queixas tipo 5 como não prioritárias, a intervenção motivada por essas queixas processa-se apenas em conjunto com as intervenções motivadas pelas outras queixas.

A título de exemplo, refira-se que, como o modo de avaria 4 é, de longe, o mais frequente, a maioria das intervenções provocadas pelo modo 5 acaba por se efectuar em conjunto com intervenções provocadas pelo modo 4, que apresenta um leque muito mais amplo de casos e, assim, com uma

probabilidade maior de apresentar exceções num enquadramento deste tipo.

Tendo-se referido a diferença existente entre a importância das duas covariáveis consideradas, máquina e amplitude da rugosidade, era relevante que se avaliasse a importância de cada uma delas para o modelo. Decidiu-se por isso avaliar a significância de cada uma das covariáveis em relação ao tempo de sobrevivência recorrendo ao método MPLR, disponível na rotina BMDP 2L, como refere BMDP (1992). Este método calcula as probabilidades de significância com base num teste alargado de verosimilhança parcial usando o valor do qui-quadrado calculado a partir do logaritmo da razão das funções de verosimilhança parcial máxima. Em cada passo, depois das estatísticas de qui-quadrado e dos respectivos valores- p terem sido calculados, remove-se a variável com valor- p maior se este for superior a um limite previamente fixado. Se nenhuma das variáveis tiver um p superior ao limite fixado para remoção faz-se entrar o termo com p menor se este for inferior ao valor fixado para entrada no modelo.

Com base no método MPLR, corrido na rotina 2L, para o conjunto de dados referentes ao modo de avaria 4, verificou-se que a covariável máquina poderia ser considerada irrelevante e que a covariável amplitude da rugosidade era relevante. Verificou-se ainda ser o valor de β para aquela última variável bastante próximo do valor já calculado em 4.2.5, tabela 4.4. Com efeito a covariável considerada relevante apresenta um valor de $\beta = 1.72$ num modelo em que entre só por comparação com um valor de 1.77 num modelo em que entre com a variável máquina.

Apesar do que ficou exposto acima, continua a ser importante referir uma tendência sistemática para um desempenho da máquina codificada como 1 ligeiramente inferior ao da máquina codificada como 0 e na qual aqui se insiste devido precisamente ao tal carácter sistemático.

4.2.7 - Validação dos resultados

Após a aplicação do modelo dos riscos proporcionais e a obtenção dos respectivos resultados, é de toda a conveniência, como aliás em qualquer trabalho experimental, que, caso existam condições, se proceda à

validação dos resultados obtidos. Nas situações que neste trabalho se têm vindo a descrever, a validação poderá ser levada a efeito de duas formas diferentes:

- recorrendo a dados reais anteriormente obtidos
- recorrendo a novas medições realizadas expressamente para este efeito

No primeiro caso é necessário que existam dados reais sobre todas as variáveis utilizadas. Caso não existam, como se verá em 4.3, em que este problema voltará a ser discutido, recorrer-se-á ao segundo processo.

Em qualquer das situações, os dados para validação, no que se refere concretamente a este trabalho, não necessitam de ser baseados apenas em casos de falha; é necessário recolher os valores para todas as variáveis num dado momento e verificar, para cada conjunto de valores, ao fim de quanto tempo se vem a verificar a falha. Cada uma destas situações vem a constituir um caso estatístico e, assim, a vários casos pode vir a corresponder a mesma falha.

Na situação agora em estudo, a validação, porque se conheciam os valores reais da única variável utilizada, foi baseada em valores anteriormente recolhidos e conhecidos que foram comparados com os valores esperados através da aplicação do modelo dos riscos proporcionais.

Construiu-se uma tabela de valores esperados e de valores reais para uma situação em que a amplitude da rugosidade era de 0.5, para valores esperados, e centrada em 0.5, com margem de 0.1 para ambos os lados, ou seja, tomando valores entre 0.4 e 0.6, para valores reais.

Realizaram-se, assim, os seguintes passos:

- a) verificaram-se todas as observações existentes

Nº total de observações 617

- b) verificaram-se quais as observações com valores da amplitude da rugosidade entre 0.4 e 0.6

Nº de observações com $0.4 < \text{ampl} < 0.6$ 119

c) verificou-se o comportamento de cada uma das 119 observações anteriores em relação ao tempo que mediou entre a observação e a 1ª falha que a partir daí ocorreu. Desta verificação resultou a eliminação de 13 casos em relação aos quais não foi possível retirar conclusões por falta de dados relativos à definição do momento da ocorrência da falha seguinte. Os outros casos estão tabelados na tabela 4.5 que apresenta também as frequências absolutas correspondentes para um valor amostral de 106 casos (119- 13).

d) calculou-se a média dos valores da função fiabilidade para os modos 1, 2 e 4 para o valor de 0.5 da amplitude da rugosidade; não se contabilizaram os modos 3 e 5 porque os valores para o tempo de sobrevivência esperado para o primeiro se afastam um pouco da média e porque não se considerou o modo 5 como relevante. A tabela 4.6 apresenta estes valores bem como as frequências absolutas correspondentes para o mesmo valor amostral de 106 casos.

e) efectuou-se um teste de qui-quadrado comparativo entre frequências reais e frequências esperadas.

t	até 8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	>13
freq rel	.25	.07	.08	.08	.17	.17	.18
freq	27	7	9	8	18	18	19

Classes de frequência por tempos de sobrevivência
após observação de $.4 < \text{ampl} < .6$
Tabela 4.5

t	até 8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	>13
freq rel	.20	.06	.08	.05	.21	.19	.21
freq	21	6	9	5	22	20	22

Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados
para $\text{ampl} = 0.5$
Tabela 4.6

As médias que representam os valores apresentados na tabela 4.6 foram realizadas tendo em conta os três modos de avaria já referidos e, para cada um deles, os dois padrões correspondentes, cada um, a cada uma das máquinas em estudo. Estes valores são apenas indicativos e destinam-se a dar uma ideia da aproximação fornecida pela aplicação do modelo dos riscos proporcionais de uma forma global.

A aplicação do teste do qui-quadrado faz-se segundo a fórmula

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(o_j - e_j)^2}{e_j} \quad (4.1)$$

em que o se refere a frequências observadas e e se refere a frequências esperadas.

Da aplicação de 4.1 aos valores apresentados nas tabelas 4.5 e 4.6 resulta para qui-quadrado um valor de 5.03. Tendo sido feita uma aplicação para 7 categorias diferentes, compara-se o valor obtido com o valor crítico de qui-quadrado para 6 graus de liberdade. Tem-se:

$$\chi^2_{.99} = 16.8$$

$$\chi^2_{.95} = 12.6$$

Face a estes resultados concluímos que as frequências observadas e as frequências esperadas não diferem de modo significativo pelo que os resultados obtidos através da aplicação do modelo dos riscos proporcionais devem ser considerados fiáveis para esta aplicação.

4.3 - Aplicação com covariáveis dependentes do tempo

4.3.1 - As rectificadoras de balanceiros

As rectificadoras de balanceiros são máquinas em tudo semelhantes às rectificadoras de eixos mas que executam um ciclo de funcionamento diferente. Esse ciclo é definido através de um programa de comando numérico no qual é definida uma sequência de operações que se podem dividir em duas categorias fundamentais, de acordo com o tipo de trabalho

efectuado sobre a peça a maquinar, ou seja, o desbaste, em que a mó actua sobre a peça, e a diamantagem, em que a mó se encontra afastada da peça para que lhe possa ser removido o material que sobre ela ficou depositado, impedindo, assim, uma rectificação conveniente.

Para que aquele conjunto de operações possa ser levado a cabo o programa que define o ciclo tem que definir com exactidão as operações do tipo desbaste, o desbaste propriamente dito, em que são retiradas às peças as quantidades de material que o chamado bruto de fundição contém em excesso, de forma a dar-lhes as dimensões exigidas, e a rectificação, em que se pretende que as peças venham a atingir a rugosidade definida de acordo com os padrões de qualidade da empresa, e as operações do tipo de diamantagem. A definição dessas operações passa pela definição dos tempos atribuídos a cada fase e, também, pela definição das posições relativas entre a mó e as peças.

É a complexidade do ciclo de fabrico que faz com que estas máquinas, simples na sua concepção, acabem por se tornar difíceis de tratar no que respeita à definição das covariáveis para um modelo como o dos riscos proporcionais.

De modo a que se possa variar a posição relativa entre a mó e as peças, é possível existir movimento relativo entre elas segundo as três dimensões do espaço. Assim, e segundo Berthiez (1987a), a mesa porta peças possui movimento de translação horizontal segundo a direcção longitudinal da máquina (X) e o eixo porta mó pode movimentar-se segundo as duas outras direcções perpendiculares à da mesa, a direcção axial, segundo a transversal da máquina (Z), e a altura (Y).

A rectificação é obtida pela passagem da mó sobre as peças através do movimento de rotação imprimido por um motor de velocidade variável entre as 450 e as 2150 rpm. Esta velocidade varia de forma a que possa ser ajustada à medida que a mó se vai desgastando pois o que se pretende obter é uma velocidade linear constante da mó na superfície da peça. Para que isso se torne possível, é necessário ir aumentando a velocidade de rotação do motor à medida que o diâmetro da mó vai diminuindo.

Associados ao funcionamento das máquinas existem alguns motores eléctricos que asseguram as operações auxiliares. Esses motores são os seguintes, de acordo com Berthiez (1987b):

- motor de deslocamento da mó segundo Z
velocidade: 3000 rpm/50 Hz
- motor de deslocamento da mó segundo Y
velocidade: 3000 rpm/50 Hz
- motor de deslocamento da mesa (X)
velocidade: 10000 rpm/167 Hz
- motor da bomba de lubrificação
velocidade: 1500 rpm/25 Hz
- motor da bomba de lavagem da peça
velocidade: 2850 rpm/48.5 Hz
- motor da bomba de líquido refrigerante
velocidade: 2900 rpm/49 Hz
- motor da bomba de limpeza da mó (diamantagem)
velocidade: 2850 rpm/48.5 Hz

Refira-se ainda que o veio das mós está apoiado em três rolamentos cuja caracterização será dada adiante. O sistema de diamantagem contém um dispositivo de avanço, com transmissão de movimento feita por correias, e uma transmissão de movimento de rotação por cardan com um veio apoiado em dois rolamentos também caracterizados adiante. Em qualquer destes casos não se contabilizam os rolamentos de apoio dos motores.

O balanceiro é uma peça que se destina a ser montada nas árvores de cames dos motores produzidos na fábrica da Renault e da qual é rectificadas a superfície ligeiramente curva que, no motor, contacta com as válvulas.

Tal como na situação tratada em 4.2, um dos parâmetros controlados pela Renault é a rugosidade das peças produzidas; no caso dos balanceiros trata-se da rugosidade da superfície acima referida.

Contudo, a empresa possui normas de qualidade para controlo dos níveis vibratórios, conforme Renault (1994), e tem em curso a implementação deste parâmetro.

4.3.2 - Recolha de dados fornecidos por Renault

A recolha de dados, para esta situação, possui vários aspectos coincidentes com o que já foi referido em 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4, no que respeita às intervenções dos serviços de manutenção, às informações fornecidas pelos serviços de produção através dos jornais de posto de trabalho e às informações obtidas por via dos serviços de controlo de qualidade no que respeita à rugosidade e à amplitude da rugosidade das peças produzidas.

De acordo com as condições acima referidas, e nas mesmas condições da situação estudada em 4.2, foi construída uma amostra de 86 casos que as tabelas 4.7 e 4.8 caracterizam no que se refere às variáveis "surv" e "reject" e à covariável "dum", cujo significado é exactamente o mesmo da situação descrita em 4.2. A situação das covariáveis definidoras dos parâmetros de funcionamento e de qualidade será dada em 4.3.5 e 4.3.7, respectivamente.

Variável	gamas de valores	Nº de casos
surv	<7	56
	7 a 14	18
	>14	12
dum	0	42
	1	44

dum: 0 - máquina código 1510
1 - máquina código 1506

Balanceiros - distribuição dos dados
segundo tempo e máquina
Tabela 4.7

	1	2	3	4	5
0	76	77	69	36	64
1	10	9	17	50	22

Em coluna - modos de avaria

Em linha - valores de "reject" (0/1)

Balanceros - distribuição dos casos quanto à situação
para cada modo de avaria

Tabela 4.8

Contudo, atendendo às particularidades deste problema, os dados referentes ao nível vibratório das máquinas tiveram que ser obtidos por via da medição directa.

4.3.3 - Recolha de dados obtidos por medição directa

Foram obtidos por medição directa os dados referentes ao nível vibratório das máquinas rectificadoras de balanceros.

Para estas medições foi utilizada uma montagem com acelerómetro de carga (ver Anexo III), amplificador de sinal e sistema de aquisição de dados que a seguir se descrevem. O parâmetro caracterizador do nível vibratório foi a aceleração do movimento vibratório. Note-se que a transformação do sinal recolhido pelo acelerómetro, para deslocamento ou velocidade, pode ser realizada automaticamente pelo "software" de aquisição utilizado (CSI Wavepack).

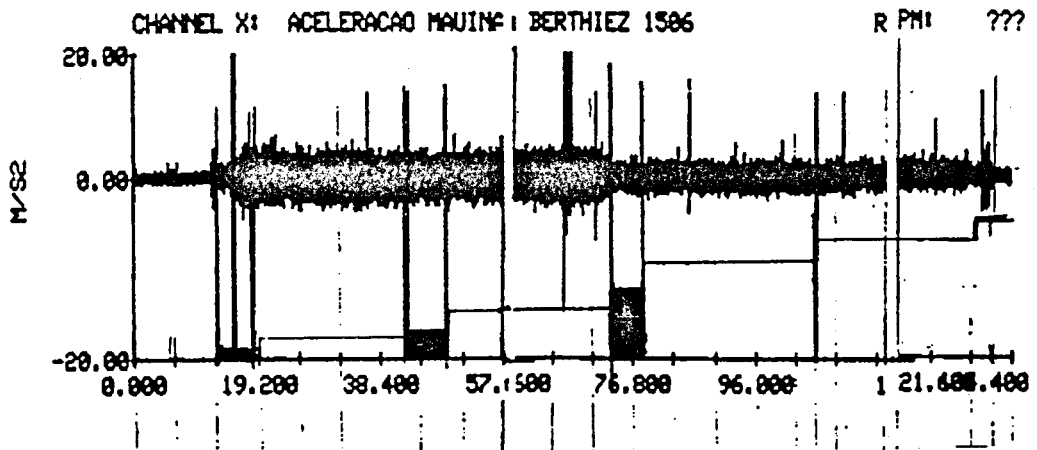
Foram os seguintes os equipamentos utilizados:

- a) acelerómetro
modelo B&K 4384
Briel & Kjaer (1989)
- b) amplificador de carga
modelo B&K 2635
Briel & Kjaer (1989)

c) aquisição e tratamento de sinal
CSI Wavepack
CSI (1991a)

A aquisição dos sinais das diferentes medições foi feita ao longo do ciclo de produção para cada caso. Assim, após a montagem do sistema de aquisição de dados, era dado início à medição aquando do início de um ciclo que se pretendesse registar. Cada um dos registos obtidos é constituído por um conjunto de espectros que cobrem todas as frequências registadas no funcionamento das máquinas ao longo do ciclo de funcionamento. Em termos globais, é construída, assim, uma cascata de espectros. O "software" Wavepack permite realizar a análise FFT (ver 4.3.5) do sinal global obtido e permite, ainda, visualizar o espectro de frequências para cada momento do ciclo.

De acordo com o exposto acima e com as informações obtidas através da análise do ciclo de funcionamento, é possível associar à cascata de frequências de funcionamento obtida (ver figura 4.3) a sequência do ciclo de funcionamento, podendo saber-se com alguma precisão que tarefa está a ser efectuada em dado momento do ciclo. É essa situação que se pretende ilustrar através da figura 4.3, em que se mostra a variação do sinal global ao longo do tempo de ciclo.



Exemplo de relação entre o sinal vibratório global
e o tempo de ciclo de funcionamento

Figura 4.3

De forma genérica podem identificar-se no ciclo as seguintes zonas de funcionamento (à frente valores típicos dos tempos acumulados no final da tarefa, em segundos):

- arranque	13.2
- diamantagem	17.4
- desbaste	42.6
- diamantagem	46.8
- desbaste (2ª passagem)	72
- diamantagem	76.2
- acabamento	103.2
- acabamento (2ª passagem)	130.2
- acabamento rápido	138.6

De referir que existe sempre uma certa discrepância entre os valores de tempos reais e os valores registados pelo computador pois o "Wavepack" pára de registar valores, para escrever no disco os que leu até então, aos 57.6 s e aos 115.2 s, demorando, de cada vez, 2.4 s a escrever esses valores no disco.

As medições efectuadas não tiveram lugar em qualquer momento específico, em termos de tempo de calendário (o tempo de sobrevivência é um caso particular do tempo de calendário, termo aqui utilizado por contraposição ao tempo de ciclo). Com efeito, e conforme se verá em 4.3.4, para cada medição do nível vibratório realizada, obteve-se sempre também o correspondente valor para o parâmetro de qualidade (rugosidade) podendo, assim, proceder-se à comparação entre ambos. Estes aspectos irão ser desenvolvidos nas secções seguintes.

4.3.4 - Enquadramento do problema

A situação que tem vindo a ser descrita nasce devido à necessidade de encontrar uma relação que permita comparar parâmetros definidores da condição dos equipamentos e da qualidade das peças produzidas.

Para parâmetro definidor da qualidade possuía-se a rugosidade da superfície rectificada e para parâmetro definidor da condição do equipamento foi decidido, visto que não existia nenhum outro previamente controlado, utilizar o nível vibratório. Esta escolha foi motivada por várias razões:

- a vibração é um indicador universalmente utilizado como caracterizador da condição de equipamentos dinâmicos - ver Wowk (1991);
- neste caso é óbvio que o nível vibratório influencia directamente a qualidade das peças produzidas, pelo que faz todo o sentido procurar encontrar uma relação entre ambos;
- outros parâmetros de condição, como análise de óleos, etc., para além de não serem controlados, não estão, pelo menos aparentemente, directamente relacionados com a qualidade dos produtos;
- o equipamento de controlo de condição através da medição e análise de vibrações é de utilização acessível e imediata sem perturbação da cadência de produção - ver Bruel & Kjaer (1989) e CSI (1989, 1991b e 1992a);

Contudo alguns problemas se colocavam no que respeitava ao conhecimento de todas as variáveis envolvidas.

Assim, sendo o parâmetro de qualidade controlado de forma praticamente contínua, poder-se-ia, fazendo um número significativo de medições pontuais do nível vibratório, construir uma amostra que permitisse obter uma relação entre ambos os parâmetros.

Mas, para obtenção do desempenho das máquinas, tal não era suficiente. Com efeito, dependendo da condição da máquina, o parâmetro de qualidade irá depender da degradação desse desempenho ao longo do tempo de funcionamento; conviria assim tratá-lo como uma covariável variável no tempo dependente deste último e do parâmetro de condição.

Repare-se que um procedimento mais simples consistiria em considerar o parâmetro de condição como dependente do parâmetro de qualidade visto

que já se conhecia este último através do controlo de qualidade; apareceria, assim, o parâmetro de condição como dependente do tempo e da qualidade. Contudo, fisicamente não é esta a situação que ocorre, conforme também é descrito em Renault (1987) que apresenta as condições que influenciam o processo, pelo que se optou pela primeira situação para a modelação deste caso. Acresce a isto que a variável de qualidade é a única variável verdadeiramente interna pois é a única que só ocorre quando o equipamento está em laboração visto que em vazio também existe vibração (em rigor, até parado).

Mas, conforme se descreve em 4.3.3, as medições efectuadas para aferição do nível vibratório são realizadas ao longo de todo um ciclo de produção e dizem respeito a toda uma gama de frequências pelo que duas outras questões se levantam:

- que momento do ciclo se considera como característico para comparação dos valores de condição e de qualidade?
- para esse momento do ciclo, que frequência(s) se vai(ão) considerar como significativa(s) para realizar a comparação?

A resposta a estas questões será dada em 4.3.5.

O procedimento adoptado foi, então, construir a amostra através dos casos de falha registados para os quais se conhecia o valor do nível vibratório, calcular, por regressão, a relação entre a rugosidade e o tempo e entre a rugosidade e a vibração e incluir aquele parâmetro de qualidade como covariável variável com o tempo e com a vibração. No capítulo 5 serão tecidos alguns comentários sobre este assunto e apresentar-se-á um modelo de procedimento como sugestão a aplicar em situações que o justifiquem.

Note-se ainda que, neste caso, não fazia sentido utilizar a amplitude da rugosidade como parâmetro de qualidade pois é a rugosidade e não a amplitude que se pode relacionar com o nível vibratório.

4.3.5 - A definição da covariável caracterizadora da condição

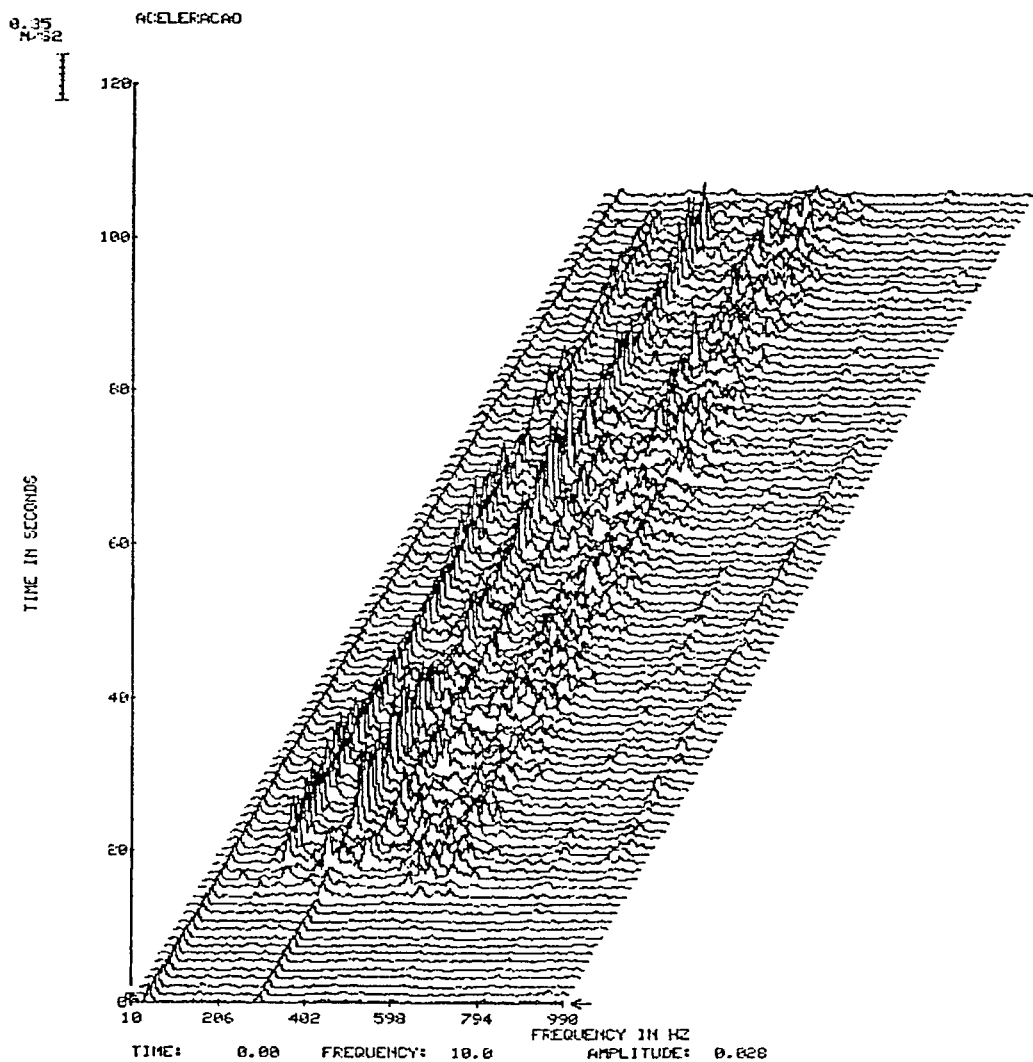
Nesta secção proceder-se-á à caracterização dos valores escolhidos para definidores do nível vibratório através da descrição do processo pelo qual foram encontrados.

Em primeiro lugar há que ter em conta que, se o objectivo era encontrar uma relação entre a rugosidade e a vibração, haveria que procurar uma zona do ciclo em que a mó estivesse em contacto com as peças rectificadas; como se viu em 4.3.3, o ciclo contém, para além da zona de arranque, zonas em que se procede à remoção do material que vai ficando depositado sobre as mós impedindo, assim, uma eficaz rectificação - é a denominada diamantagem. À partida, pois, teria que se relacionar a rugosidade com o nível vibratório observado fora das zonas de arranque e de diamantagem.

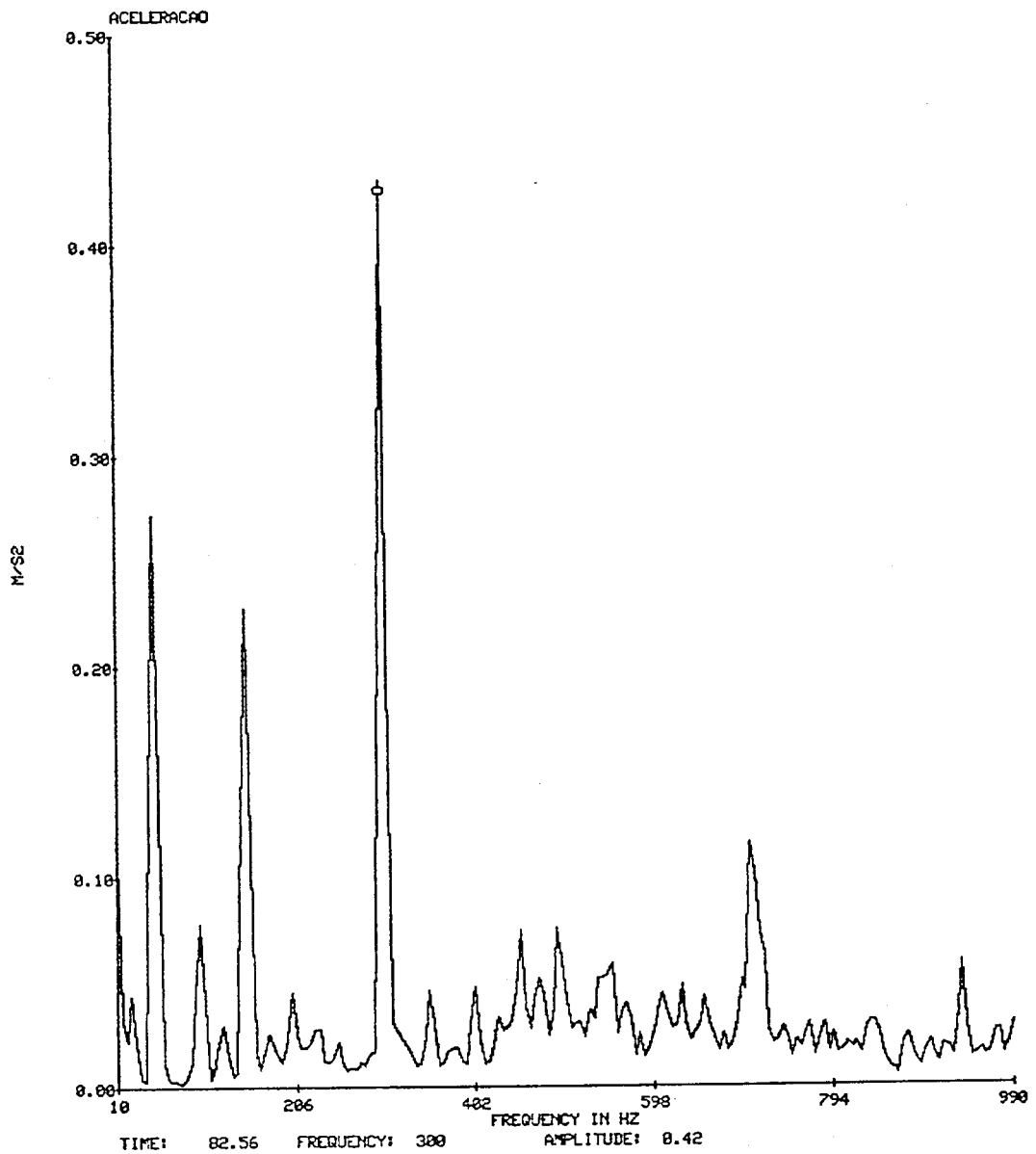
Mas, em relação às zonas em que existe o contacto entre a mó e a peça, há que considerar o efeito das diferenças existentes entre as diferentes peças antes da rectificação, ou seja, as diferentes dimensões dos brutos de fundição que levam a que possa haver uma maior ou menor quantidade de material a desbastar; ora, quantidades maiores de material a desbastar fazem aumentar o nível vibratório verificado nesses períodos, destruindo também uma relação entre a rugosidade e a vibração visto que se observam variações no nível vibratório que não se repercutirão necessariamente na rugosidade.

As considerações anteriores levam também à eliminação da escolha das zonas de desbaste como características do nível vibratório e conduzem-nos à escolha das últimas zonas do ciclo, as de acabamento, como as zonas dentro das quais há que recolher o nível característico de vibração; de acordo com este princípio seleccionou-se a zona de acabamento rápido, com uma duração aproximada de 8 segundos, pois, sendo a última passagem da mó acaba por ser nesta operação que a rugosidade final fica definida.

Na figura 4.4 apresenta-se um exemplo de uma cascata de frequências obtida ao longo do tempo de execução de um ciclo de fabrico e, na figura 4.5 apresenta-se um espectro de frequências correspondente a um dado momento do ciclo dentro de uma zona de acabamento.



Cascata de frequências no ciclo de fabrico
Figura 4.4



Espectro de frequências num momento de acabamento
Figura 4.5

Como se pode verificar através da observação das figuras 4.4 e 4.5, a existência de uma gama vasta de frequências e, de ente esta, a ocorrência de vários picos perfeitamente definidos, faz com que haja também de seleccionar quais as que melhor possam fornecer valores de nível vibratório relacionáveis com a rugosidade. Para isso há que conseguir determinar a que se deve a existência de cada um dos picos que ocorrem ao longo do espectro ou, pelo menos, verificar se alguns deles terão correspondência no espectro de rugosidades que se obtém quando uma peça é passada no rugosímetro.

Para a definição de cada pico houve que proceder a um levantamento de alguns componentes da máquina e das suas características. Como se viu em 4.3.1, há um conjunto de motores eléctricos trabalhando a frequências próximas dos 50 Hz e dos 25 Hz - ambas estas frequências aparecem no espectro com picos definidos mas recordemos que os 50 Hz correspondem também à frequência da corrente eléctrica.

Para além disto, são visíveis no espectro picos correspondentes às frequências de 100, 150 e 300 Hz, entre outros. Salvaguardando a existência de diferentes harmónicas, procedeu-se também à pesquisa das frequências características dos rolamentos de apoio dos diferentes veios, conforme referido em 4.3.1.

Para poder considerar as frequências típicas dos rolamentos tem que se conhecer qual a velocidade de rotação dos veios respectivos o que, no caso destas rectificadoras, implica, para os rolamentos do veio das mós, o levantamento da velocidade de rotação em cada caso pois esta é, veja-se 4.3.1, variável. Há ainda que verificar se essas frequências têm correspondência no espectro de rugosidades.

Nos veios das mós e de diamantagem existem os seguintes rolamentos:

- veio das mós
 - 2 rolamentos NN3024 K TN9 (SKF)
 - 1 rolamento 71926 ACD/P4A (SKF)
- veio da diamantagem
 - 4 rolamentos 7208 CDP4 DBH (SKF)

Wowk (1992) indica que podem ser definidas 4 frequências distintas para os rolamentos de esferas, correspondentes a outros tantos tipos de defeitos:

- FTF (fundamental)
- BS (esferas)
- OR (caminho exterior)
- IR (caminho interior)

No anexo VII indicam-se as fórmulas de cálculo para cada uma destas frequências. Contudo, CSI (1991a) indica os valores destas frequências para os rolamentos acima referidos e para uma velocidade de rotação de referência de 60 rpm. A tabela 4.9 mostra esses valores.

CSI (1991a) indica ainda os valores para as 4 primeiras harmônicas destas frequências e, ainda, as frequências correspondentes às bandas laterais das mesmas 4 primeiras harmônicas das frequências dos caminhos interior e exterior .

	NN3024 K TN9	71926 ACD/P4A	7208 CDP4 DBH
FTF	.45	.45	.40
BS	5.35	4.84	2.26
IR	15.3	14.75	7.83
OR	12.7	12.25	5.17

Frequências associadas aos rolamentos
dos veios das rectificadoras (em Hz)

Tabela 4.9

Conforme com o exposto anteriormente, as frequências dos rolamentos do veio da diamantagem não terão grande interesse em termos de comparação, pelo que nos debruçaremos a partir de agora sobre os valores das frequências dos rolamentos do veio das mós. Como as frequências indicadas na tabela 4.9 se referem a uma velocidade de rotação de 60 rpm, há que convertê-las para os valores correspondentes à velocidade de rotação que se verificava aquando de cada medição, de modo a verificar se alguma daquelas frequências é visível no espectro.

Para aferição da relação entre a rugosidade das peças e o nível vibratório foram obtidos, entre outros, espectros de frequência e espectros de rugosidade para um número significativo de ciclos de produção realizados num espaço de três dias consecutivos. Sendo variável a velocidade de rotação do veio das mós, houve que controlar também este parâmetro que, atendendo ao reduzido intervalo de tempo em que as medições acima referidas foram obtidas, não teve variações significativas tendo oscilado, aproximadamente entre as 1680 e as 1700 rpm.

As frequências correspondentes à velocidade de 1700 rpm obtêm-se multiplicando os valores que constam da tabela 4.9 pela razão das duas frequências:

$$F_w = F_{ref} \cdot \frac{\omega_w}{\omega_{ref}} \quad (4.2)$$

De 4.2 tiram-se os valores da tabela 4.10.

	NN3024 K TN9	71926 ACD/P4A
FTF	12.75	12.75
BS	151.6	137.0
IR	433.5	417.9
OR	360.0	347.0

Frequências dos rolamentos dos veios das mós
à velocidade de 1700 rpm (em Hz)
Tabela 4.10

Da observação dos valores anteriores pode verificar-se que há frequências coincidentes com algumas das que se podem observar no espectro de frequências, como é o caso dos 150 Hz e dos 12.75 Hz. Poderá explicar-se também a frequência de 300 Hz, dupla de 150 Hz.

Para complementar a análise das frequências observadas, de modo a concluir ou não da sua significância, fez-se uma análise semelhante em relação ao espectro de rugosidades das peças produzidas.

O espectro de rugosidade é o gráfico que se obtém quando se faz passar a superfície rectificada no rugosímetro; é um gráfico de rugosidade vs. comprimento. Quando se fala em rugosidade de uma dada peça está-se a considerar a média dos valores que a rugosidade apresenta ao longo de todo esse comprimento. Na Renault esses gráficos são normalmente obtidos ao longo do comprimento segundo a direcção perpendicular à direcção de rectificação.

Foi, pois, em relação ao espectro de rugosidade que se procedeu também a uma análise de frequência de modo a verificar se haveria alguma(s) frequência(s) comum(ns) entre o espectro de rugosidade e o espectro de vibração. Isto porque se pensou que uma frequência que se conseguisse

identificar em ambos os espectros seria, sem dúvida, uma frequência característica, independentemente do seu significado.

Concluir-se pela significância de uma dada frequência não significa necessariamente que se saiba exactamente a que fenómeno corresponde mas apenas à constatação de que é característica do funcionamento da máquina. Essa eventual frequência será relevante para o estabelecimento da relação entre rugosidade e vibração se não a associarmos com qualquer fenómeno concreto, perfeitamente identificado, que se saiba variar com o tempo de sobrevivência. Por exemplo, uma frequência característica de um dado defeito nos rolamentos poderá aparecer nos dois espectros mas o seu nível tenderá a aumentar com o tempo de sobrevivência e não poderá servir para relacionar directamente vibração com rugosidade.

As eventuais frequências comuns encontrar-se-iam ao longo da direcção segundo a qual se efectua a rectificação e não segundo a direcção perpendicular pelo que houve que obter também um espectro de rugosidade segundo a direcção de rectificação.

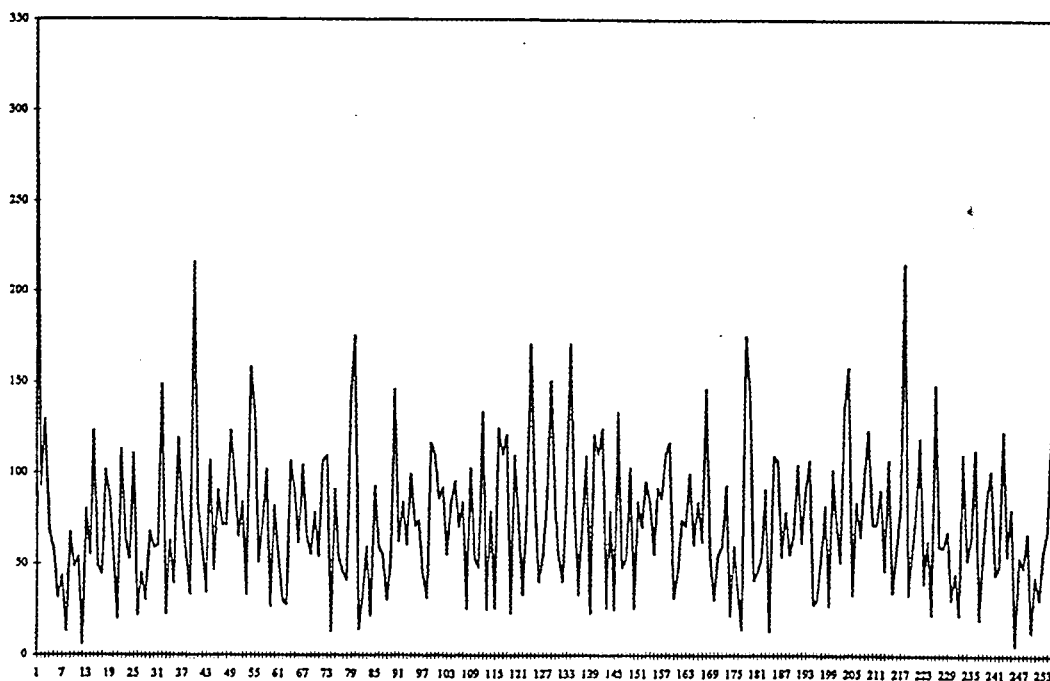
Para obter as frequências correspondentes ao gráfico rugosidade vs. comprimento teve que se proceder a uma análise FFT desse gráfico. Como não houve acesso ao sinal digitalizado, a imagem resultante da passagem desse gráfico para computador, através de "scanner", teve que ser digitalizada e é essa digitalização que está na origem da obtenção de tais gráficos.

A realização dessa digitalização passou por algumas operações prévias de ampliação e de transposição para computador eliminando ou clarificando, ao mesmo tempo, algumas zonas do gráfico onde a resolução das linhas não era satisfatória não tendo, assim, sido realizada de forma completamente automática (digitalização guiada pelo autor e pelo operador à medida que a linha ia sendo obtida).

As ampliações foram realizadas de acordo com a seguinte sequência:

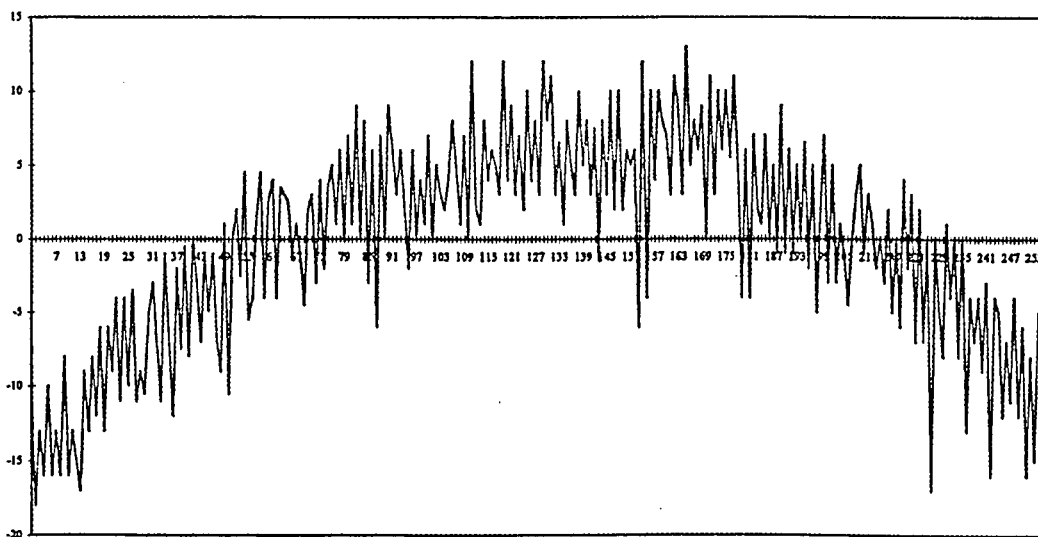
- ampliação em fotocópia do gráfico inicial
- passagem da imagem para computador
- observação da resolução obtida e eventuais ampliações locais ("zoom") para observação de pormenor

As figuras 4.6 e 4.7 ilustram dois exemplos de gráficos de rugosidade vs. comprimento obtidos já após tratamento de imagem, ao longo, respectivamente, da direcção perpendicular à rectificação e da direcção de rectificação. A digitalização é obtida também por "software" próprio tendo sido todos estes trabalhos realizados por recurso aos serviços de uma empresa privada.



Rugosidade vs. comprimento segundo a perpendicular à rectificação

Figura 4.6



Rugosidade vs. comprimento ao longo da rectificação

Figura 4.7

Após a digitalização procedeu-se à análise em frequência através da análise FFT (Fast Fourier Transform), um processo expedito baseado na análise de Fourier; trata-se de um método discreto de análise de Fourier que deve o seu nome ao facto de ser muito mais rápido que aquela última mas que permite realizar análises idênticas num tempo mais curto. Isto porque muitas operações de cálculo dos coeficientes em que a análise de Fourier se baseia são idênticas e a análise FFT, por isso, só as realiza uma vez. Note-se o facto de o algoritmo utilizado para esta análise, contido no "software" Excel, necessita que o número de pontos utilizado seja uma potência de dois. O Anexo VIII dá indicações sobre a análise de Fourier.

As análises FFT realizadas sobre os valores digitalizados do gráfico rugosidade vs. comprimento ao longo da perpendicular à rectificação não permitiram a identificação de quaisquer picos de intensidade do nível vibratório que, ao longo da gama de frequências, sobressaíssem do conjunto geral.

O mesmo já não se passa quando se procede a uma análise semelhante ao longo da direcção de rectificação; essa análise permite, ao longo da gama de frequências que se conseguiu abranger, identificar vários picos, conforme se pode verificar através das figuras 4.8 e 4.9, que representam o resultado da análise FFT realizada sobre os valores digitalizados correspondentes à superfície de que a figura 4.7 representa um sector. Ver-se-á também seguidamente quais os problemas colocados pelo processo que conduziu à obtenção destes valores, explicando-se, ao mesmo tempo, as figuras 4.8 e 4.9.

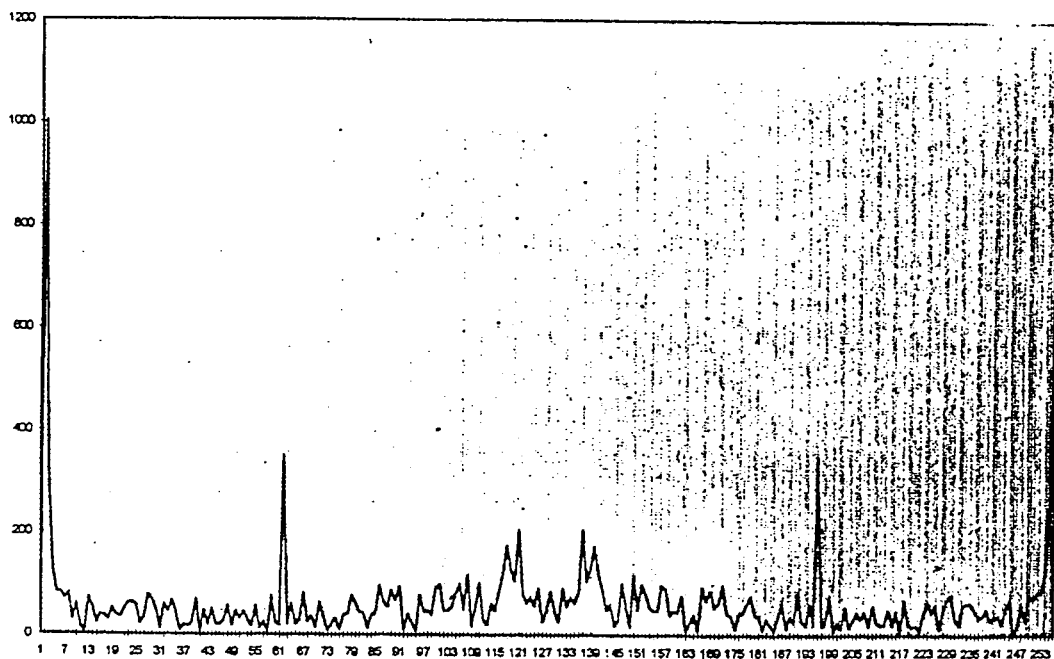
Os valores indicados, em abcissas, nas figuras 4.8 e 4.9 para as frequências a que correspondem os picos têm agora que ser convertidos para as verdadeiras frequências porque as escalas aí utilizadas não correspondem à realidade.

Assim, há que começar por definir a frequência de amostragem:

$$f_{amo} = \frac{1}{T} \quad (4.3)$$

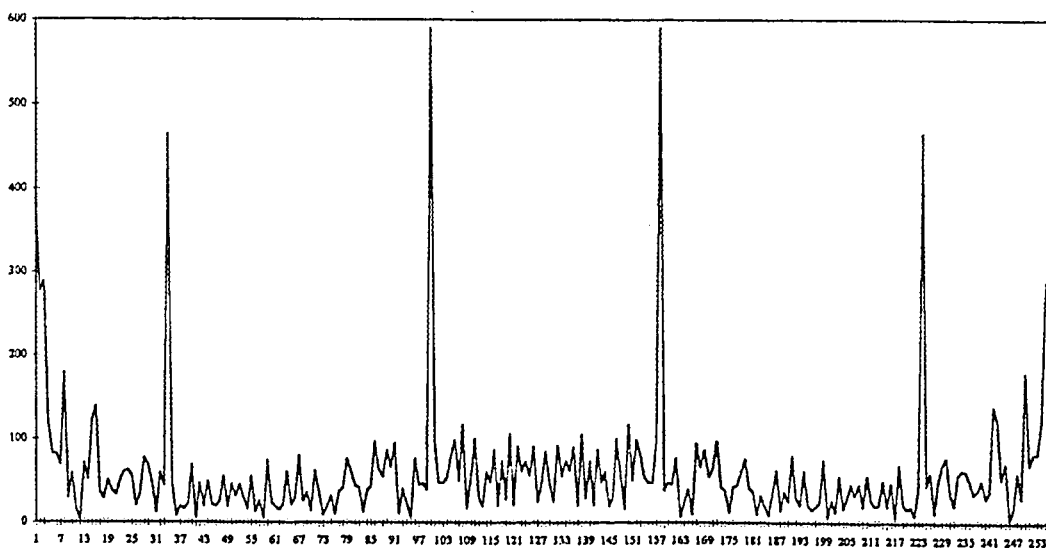
em que T representa o período de amostragem ou, seja, o tempo ao longo do qual são recolhidos os pontos em número tal que corresponda a uma potência de 2 (num máximo de 1024 no caso do Excel). Por exemplo, nos

casos representados foram analisados 256 pontos ao longo de 4.85 e 0.7 seg, respectivamente.



FFT correspondente a 256 pontos
referentes a 4.85 seg de acabamento

Figura 4.8



FFT correspondente a 256 pontos
referentes a .7 seg de rectificação

Figura 4.9

A largura da banda é o quociente entre a frequência de amostragem e o número de pontos da análise:

$$- b_w = \frac{f_{amo}}{N} \quad (4.4)$$

Posto isto, repare-se que a frequência de amostragem da escala das figuras é de 1 Hz, visto que não houve qualquer preocupação de escolha da escala quando se introduziram os gráficos no computador.

Assim, tem-se:

$$- f_r = b_w \frac{N}{t} f \quad (4.5)$$

em que

- f_r - frequência real
- t - tempo de amostragem
- f - frequência indicada

O tempo de amostragem foi calculado na seguinte base: se correr toda a escala de abcissas corresponde ao tempo de acabamento de 8 seg (ver 4.3.3), correr a % dessa escala corresponde a um tempo de amostragem de 8 seg x a %.

Através da figura 4.8 conseguem-se detectar picos em 62, 117 e 122. A frequência, em Hz, correspondente a cada um deles será:

- 62

$$f_{62} = .0039 \frac{256}{4.85} 62 = 12.76$$

- 117

$$f_{117} = .0039 \frac{256}{4.85} 117 = 24.1$$

-122

$$f_{122} = .0039 \frac{256}{4.85} 122 = 25$$

Estes valores revelam desde logo as frequências de 12.5 e 25 Hz como características, avançando-se a hipótese de a primeira corresponder à frequência FTF dos rolamentos e a segunda talvez à do motor eléctrico da bomba de lubrificação (ver 4.3.1).

Como a gama de frequências coberta por esta digitalização ainda se revelava curta, procedeu-se a nova ampliação e à análise de 256 pontos num intervalo correspondente a 0.7 seg de rectificação numa zona central para evitar o mais possível a curvatura da superfície que se reflecte na figura 4.8 através do grande pico logo no início. A continuação desta análise com vista à eventual detecção de ainda maiores frequências revelou-se impraticável por se começar a tornar impossível a distinção entre os diferentes tipos de pontos sobre o monitor do computador.

A análise posterior, cujos resultados são revelados pela figura 4.9, revelou os picos de 34 e 101, conforme se pode verificar. Como o tempo de análise é de 0.7 seg para 256 pontos, será, em Hz:

- 34

$$f_{34} = .0039 \frac{256}{.7} 34 = 48.5$$

- 101

$$f_{100} = .0039 \frac{256}{.7} 101 = 144.1$$

Salvaguardados alguns erros e aproximações inevitáveis, parecem estar detectadas as frequências de 50 Hz (motores, corrente?) e de 150 Hz.

Como as frequências de 12.5 e de 150 Hz estão associadas aos rolamentos, restam-nos como frequências características as de 25 e de 50

Hz, cujos níveis vibratórios irão servir como variáveis de condição e serão comparados com os respectivos valores para a variável de qualidade, a rugosidade. A secção 4.3.6 abordará esta questão.

Resumindo, podem ser utilizadas neste caso as frequências que sejam características do funcionamento da máquina e as que possam ser associadas aos momentos do ciclo em que existe contacto entre a mó e a peça; estes dois pressupostos são assegurados através da constatação da existência destas frequências na cascata de frequências e no espectro de rugosidade. Para além disso interessa que se trate de frequências que se mantenham ao longo do tempo de calendário\sobrevivência o que não acontece com frequências que respeitem apenas aos rolamentos. Quanto às frequências escolhidas interessa-nos saber que se mantêm ao longo do tempo, visto que sempre foram detectadas nas cascatas e não aparecem associadas aos rolamentos, e que são características, porque existem nas cascatas e nos espectros de rugosidade; seria preferível que se pudessem conhecer exactamente a que fenómenos estão associadas mas mesmo as condições existentes são suficientes para que possam ser utilizadas.

De acordo com o que se expôs acima, podem definir-se duas novas variáveis, que serão utilizadas à vez como covariáveis no modelo dos riscos proporcionais, com a designação de vib25 e vib50, designando, respectivamente, o nível vibratório às frequências de 25 e 50 Hz. As tabelas 4.11 e 4.12 apresentam a distribuição dos seus valores por classes de frequência para os 86 casos que constituem a amostra que serviu de base ao estudo.

vib25	<.05	.05 a .1	.1 a .15	>.15
freq.	42	18	26	0

Distribuição de valores de vib25 por classes de frequência
Tabela 4.11

vib50	<.1	.1 a .3	.3 a .5	>.5
freq.	42	11	32	1

Distribuição de valores de vib50 por classes de frequência
Tabela 4.12

4.3.6 - A relação entre a rugosidade e o nível vibratório

Definidas que estão as frequências características do funcionamento da máquina em operação, há que proceder ao estabelecimento de uma relação entre a rugosidade e os respectivos níveis vibratórios.

Antes de mais, convém esclarecer que, embora se tenham definido duas frequências, a utilização das frequências definidas como covariáveis não se fará em conjunto. Isto porque, e talvez porque ambas estejam associadas entre si, se revelou impossível conseguir a convergência do modelo dos riscos proporcionais considerando ambas as frequências como covariáveis em simultâneo por motivos relacionados com a dependência linear entre os respectivos valores amostrais. Por outro lado, a ser assim, tal não faria sentido pois, no fundo, seria como se se tratasse da mesma covariável.

Proceder-se-á, assim, à construção de duas relações distintas, uma relacionando a rugosidade com a intensidade de vibração à frequência de 25 Hz e outra que relaciona a mesma rugosidade com a intensidade à frequência de 50 Hz, nas condições já definidas em 4.3.5.

A rugosidade está relacionada ou depende da vibração, e essa relação serve para que possamos tirar conclusões sobre a qualidade dos produtos fabricados a partir da condição dos equipamentos ou vice-versa, mas varia também com o tempo, conforme será tratado em 4.3.7. Mas, na prática, não estamos interessados numa função de duas variáveis; antes, em dois processos separados de relacionamento pois é essa situação que reflecte o processo de funcionamento e de controlo.

Em termos físicos, não existem, aliás, elementos que permitam concluir por uma situação em que a relação entre aquelas três variáveis seria descrita através de uma função de uma variável, por hipótese a rugosidade, em função das outras duas de que cada uma das já referidas funções em separado seria a projecção dessa função de duas variáveis sobre cada uma delas, respectivamente, ou, então, através de uma composição de funções em que, por exemplo, a vibração poderia ser função do tempo e a rugosidade seria função da vibração. Estes aspectos serão novamente abordados no capítulo 5.

Face às considerações anteriores, procede-se nesta secção ao estabelecimento de uma relação entre a rugosidade e a vibração.

Existindo um conjunto apreciável de pares de valores, começou por se aplicar uma aproximação estatística por regressão linear e por regressão quadrática. Tais aproximações tiveram, contudo, que ser corrigidas devido às condições fronteira do problema.

As condições fronteira do problema estabelecem o seguinte:

- a rugosidade é sempre maior ou igual a 0;
- a vibração é sempre maior ou igual a 0;
- vibração igual a 0 implica sempre rugosidade igual a 0 pois esta situação corresponderia a máquina parada o que implicaria ausência de produção e de rugosidade;

A terceira condição é meramente teórica pois, na prática, não é possível obter rugosidade 0 numa situação que não corresponda a ausência de produto, situação a que a 4ª condição se refere.

Já se referiu que é a rugosidade que depende da vibração e não o contrário, sendo lógico, por isso, que se procurasse apenas a relação $\text{rug}(\text{vib})$. Contudo, como a empresa controla normalmente a rugosidade e não a vibração decidiu-se também pela obtenção da relação $\text{vib}(\text{rug})$ de modo a que se possam fazer previsões sobre a condição da máquina a partir do conhecimento do parâmetro de qualidade.

No que respeita à obtenção da relação entre vibração e rugosidade, fizeram-se tentativas de ajustamento, por regressão estatística, de polinómios do primeiro e do segundo grau que ajustassem os dados existentes para a vibração e a rugosidade. Recorreu-se para isto à rotina BMDP 5R não tendo os resultados obtidos satisfeito as condições fronteira visto que conduziam a previsões negativas para alguns valores da intensidade vibratória. Note-se que os polinómios do 2º grau conduziriam necessariamente a situações que não cumpriram as condições fronteira pois são compostos por dois ramos e só por muito acaso o mínimo estaria na origem. A razão pela qual foram testados esteve apenas relacionada com a tentativa de obtenção de resíduos menores, pelo menos para determinadas zonas do ajustamento.

De acordo com as condições acima expressas, decidiu-se que a solução poderia passar, para a frequência de 25 Hz, pela consideração do ajustamento do 2º grau a partir do ponto de inflexão e por um ajustamento linear entre a origem e esse ponto. Para os 50 Hz, procedeu-se ao mesmo ajustamento mas apenas com o 1º grau. Por uma questão de coerência, poderá considerar-se também o ajustamento corrigido do 1º grau para os 25 Hz. Obtiveram-se, assim as seguintes funções:

- nível vibratório correspondente à frequência de 25 Hz (vib25)

$$vib25 = \begin{cases} .45rug^2 - .84rug + .4 & \longrightarrow rug > .93 \\ .0086rug & \longrightarrow rug \leq .93 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$vib25 = \begin{cases} .108rug - .09 & \longrightarrow rug \geq 1.01 \\ .018rug & \longrightarrow rug < 1.01 \end{cases} \quad (4.7)$$

- nível vibratório correspondente à frequência de 50 Hz (vib50)

$$vib50 = \begin{cases} .425rug - .39 & \longrightarrow rug \geq 1.01 \\ .039rug & \longrightarrow rug < 1.01 \end{cases} \quad (4.8)$$

As expressões 4.6, 4.7 e 4.8 têm por objectivo, apenas, fornecer informações para previsão do nível vibratório a partir da rugosidade. A sua utilidade aumentará na medida em que existam definidos padrões para nível vibratório ou aumento de nível vibratório considerados como alarme.

Para a continuação deste trabalho interessa essencialmente considerar a relação rug(vib) para inclusão no modelo. A correlação estatística voltou a não conduzir a resultados razoáveis porque baseou muito a aproximação no termo de grau zero pelo que se decidiu utilizar uma inversão simples aproximada pelo ramo inicial de 1º grau em 4.7 e 4.8, respectivamente para os 25 e os 50 Hz.

Fomos conduzidos a:

- 25 Hz

$$rug \approx 53vib25 \quad (4.9)$$

- 50 Hz

$$rug \approx 26vib50 \quad (4.10)$$

As expressões 4.6 a 4.10 exprimem a relação entre a rugosidade e a vibração ou vice-versa e poderão ser utilizadas na medida em que modelos de sobrevivência que a elas façam recurso forneçam aproximações razoáveis à situação real em termos de parâmetros do equipamento motivadas pela ocorrência de falhas, quaisquer que elas sejam.

4.3.7 - A rugosidade como covariável dependente do tempo

De acordo com o exposto em 4.3.6, pode-se estabelecer uma relação entre a rugosidade e o tempo, considerando a rugosidade como a covariável mais adequada em termos de caracterização como covariável interna. Esta relação foi obtida por simples correlação estatística utilizando as rotinas BMDP 3R e 5R. A rotina 3R serviu para ensaiar um ajustamento exponencial e a rotina 5R para ensaiar um ajustamento linear. Em termos físicos são estas as duas formas que se podem minimamente justificar, a exponencial por semelhança com a distribuição mais simples de taxa de avarias constante ou com a distribuição de Weibull e a linear por relação simples.

Contudo, a exemplo do que também sucedeu em 4.3.6, houve que ajustar as aproximações às condições fronteira; para além dos valores sempre positivos da rugosidade, houve que ter em atenção que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} rug = 0$$

em que

- rug - rugosidade no início de contagem do tempo de sobrevivência
- t - tempo de sobrevivência verificado para um dado caso

A observação desta condição levou a que a aproximação linear obtida estatisticamente tivesse que ser corrigida. Com efeito, o elevado número de casos com tempos de sobrevivência relativamente baixos, levou a que a rotina 5R tivesse desprezado no seu ajustamento os valores

correspondentes a tempos de sobrevivência mais elevados; assim, guardando a ordenada encontrada na origem, decidiu-se utilizar como aproximação linear a recta definida pela ordenada na origem, 1.66, e pela condição $t=30$, $rug=0$.

Como se referiu em 4.3.6, a rugosidade depende também da vibração. Para que o modelo reflectisse também essa dependência, entrou-se em linha de conta, como covariável para correr o modelo, não com a rugosidade mas com o seu quadrado expresso como um produto das duas relações da rugosidade, respectivamente com a vibração e com o tempo.

O modelo dos riscos proporcionais foi assim corrido, para cada modo de avaria, quatro vezes, duas por cada frequência, uma com a aproximação exponencial e outra com a aproximação linear. Foram usadas as seguintes aproximações para definição da covariável rugosidade (rug):

- aproximação linear e frequência de 25Hz

$$rug = 52.9 \text{ vib25 } (-.05T + 1.66)$$

- aproximação linear e frequência de 50 Hz

$$rug = 26 \text{ vib50 } (-.05T + 1.66)$$

- aproximação exponencial e frequência de 25 Hz

$$rug = 52.9 \text{ vib25 } (1.85 \exp(-.05T))$$

- aproximação exponencial e frequência de 50 Hz

$$rug = 26 \text{ vib50 } (1.85 \exp(-.05T))$$

em que

rug - quadrado da rugosidade
 vib25 - nível vibratório a 25 Hz
 vib50 - idem a 50 Hz
 T - tempo de sobrevivência

4.3.8 - Resultados obtidos

Nas secções 4.3.2 a 4.3.7 procedeu-se à descrição dos processos seguidos com vista à obtenção dos dados e à caracterização das variáveis. Tendo-se optado por testar, embora em separado por razões já apontadas, variáveis referentes aos níveis vibratórios correspondentes às frequências de 25 e de 50 Hz, serão apresentados, também em separado, os respectivos resultados. O mesmo se passará em relação às aproximações exponencial e linear da variação da rugosidade com o tempo.

Para a obtenção dos resultados foi também utilizada a rotina BMDP 2L, como já tinha acontecido nas situações anteriormente estudadas, respectivamente no capítulo 3, e referente ao moinho autogéneo, e em 4.2, desta vez referente às rectificadoras de eixos.

Só que, nessas situações não estavam em jogo covariáveis variáveis no tempo, pelo que a rotina referida apresentava, para além dos valores dos coeficientes de regressão, os valores obtidos para a função de sobrevivência permitindo até a sua representação gráfica.

Com covariáveis variáveis no tempo, a rotina 2L limita-se a fornecer os valores para os coeficientes de regressão pelo que houve que utilizar um programa adicional para obter os valores da função de sobrevivência. Esse programa teve que ser especificamente construído para o efeito tendo-se, para isso, optado pelo recurso à linguagem de programação Basic. Para a representação gráfica dos resultados obtidos com a utilização deste programa recorreu-se ao Excel.

As características do programa e o modelo usado para a sua construção serão descritos a seguir nesta sub-secção onde serão tratados sucessivamente os processos pelos quais se conseguiu chegar à obtenção dos resultados. No anexo IX apresenta-se uma listagem comentada do programa nas duas versões utilizadas.

4.3.8.1 - O programa para a obtenção da função de sobrevivência

O programa que se encontra no anexo IX baseia-se na estimativa da função de risco base apresentada por Breslow na discussão de Cox (1972) e exposta em 2.6.

Recorre-se às expressões 2.25 e 2.26 para a estimativa da função de risco acumulado e às expressões 2.28 e 2.29 para a estimativa da função de sobrevivência.

Para que tal se torne possível, e porque a expressão 2.26 usa um somatório onde cada termo depende da posição de cada caso em relação ao conjunto (ou seja, por exemplo, para o primeiro caso o número de falhas é de 1 e o denominador é constituído pelos valores referentes aos outros 85) há que constituir uma base de dados onde os casos estejam ordenados por ordem crescente do tempo de sobrevivência. Foram assim constituídas as bases de dados que, ao longo do programa, vão sendo sucessivamente chamadas como entradas.

O anexo IX apresenta uma explicação detalhada de todo o processo. Os resultados obtidos são em seguida transpostos para Excel de modo a que se obtenham os gráficos equivalentes aos que se obteriam recorrendo a BMDP 2L.

Um aspecto extremamente importante é o que se relaciona com a escala de tempos; este aspecto pode obrigar a uma modificação da escala de modo a conciliar os resultados obtidos. Com efeito, no caso que se está a estudar, e porque os valores das covariáveis contínuas são tomados no início da contagem do tempo de sobrevivência, por razões já apontadas, quanto maiores forem esses valores, menor é esse tempo, em termos gerais. Está-se a definir uma variável associada ao momento inicial do tempo de sobrevivência. Quando se faz a representação gráfica de uma função que depende do tempo em função desse tempo, pretende-se associar a cada valor em abcissa, o tempo, o valor dessa função correspondente a esse tempo.

Tem-se, assim, dois tipos de escalas:

- para cálculo da função de sobrevivência, associa-se a cada valor do tempo de sobrevivência observado, o valor da covariável no início da contagem desse mesmo tempo; nesta perspectiva, a maiores valores correspondem menores tempos porque quanto menor é o valor da

covariável mais tempo é de esperar que o equipamento consiga sobreviver;

- para a representação gráfica, associa-se a cada momento no tempo o valor da covariável nesse mesmo momento; nesta perspectiva, e porque o funcionamento se vai degradando à medida que o equipamento vai funcionando, a maiores tempos correspondem maiores valores das covariáveis;

Se se pudesse ter trabalhado com os valores das covariáveis no momento da falha não seria necessário ter procedido a esta alteração de escala pelo que este aspecto deverá servir, antes de mais, para alertar para o cuidado que há que pôr na escolha da escala de tempos.

Como, para alterar a escala, há que proceder a uma contagem de tempos inversa, houve que definir um valor característico do tempo de sobrevivência máximo. Atendendo aos valores existentes, à situação que se observa na fábrica em termos de planeamento de operações, etc., para esse valor tomou-se $t=30$, ou seja, 1 mês.

4.3.8.2 - Vibração a 25 Hz e aproximação exponencial

No caso da vibração a 25 Hz não se conseguiu obter uma convergência satisfatória para todos os modos de avaria. Por resultados satisfatórios entendem-se aqueles que, para além de convergirem, o façam com erros de ordem de grandeza menor ou igual à do resultado.

A quantidade relativamente pequena de casos não censurados para estes modos de avaria poderá estar na origem desta situação.

Para obviar a esta situação houve que proceder a alguns ajustes nas expressões que relacionam a rugosidade com o tempo. No que se segue, sempre que tal acontecer, indica-se explicitamente a expressão alternativa que tiver sido utilizada. -

As tabelas 4.12 a 4.16 apresentam os resultados obtidos com a rotina 2L para a vibração a 25 Hz e a aproximação exponencial, para os diferentes modos de avaria.

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.1325	1.1236	1.0079	3.1035
vib25	4.0882	3.6412	1.1228	59.6348
rug	-.2975	.4523	-.6578	.7427

$p = .4344$

Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação exponencial rug(t) (modo de avaria 1)

Tabela 4.13

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	.6721	1.0785	.6232	1.9584
vib25	-7.3543	11.2948	-.6511	.0006
rug	1.1516	1.3463	.8554	3.1631

$p = .2093$

Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação exponencial rug(t) (modo de avaria 2)

Tabela 4.14

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.7673	.8929	1.9794	5.8553
vib25	4.8600	4.3911	1.1068	129.0302
rug	-.1444	.5421	-.2664	.8655

$p = .0012$

Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação exponencial rug(t) (modo de avaria 3)

Tabela 4.15

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.2826	.4871	2.6331	3.6061
vib25	.6750	.3511	1.9226	1.9641
rug	.3750	.3956	.9479	1.4550

$p = .0002$

Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação exponencial rug(t) (modo de avaria 4)

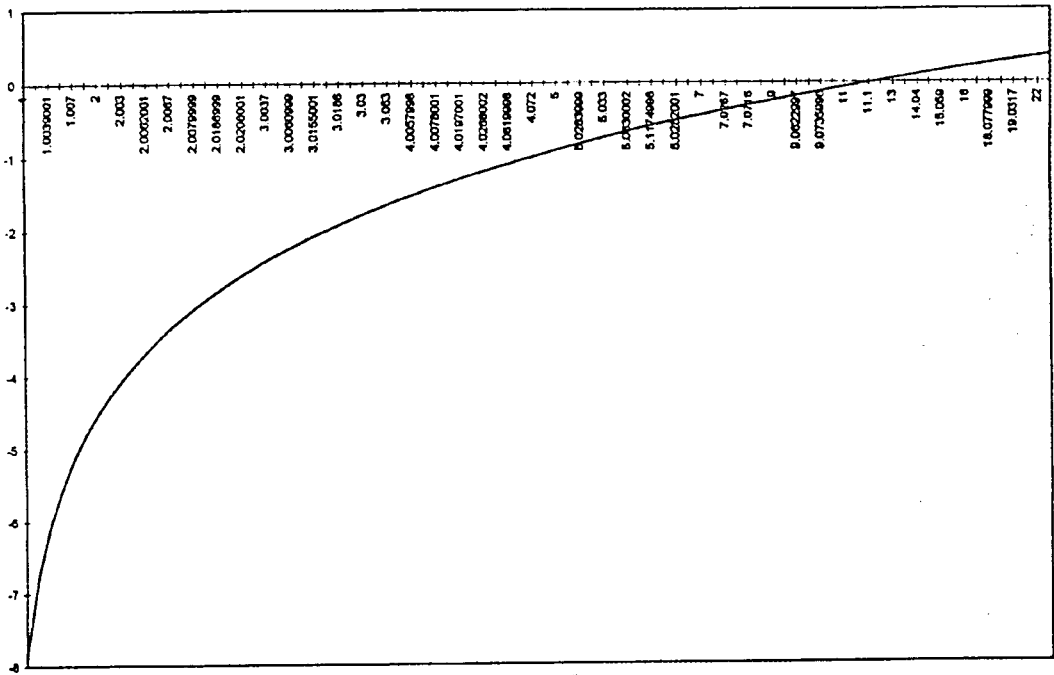
Tabela 4.16

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.7300	.7318	2.3639	5.6405
vib25	3.6072	2.8945	1.2462	36.8638
rug	-.1204	.3474	-.3465	.8866

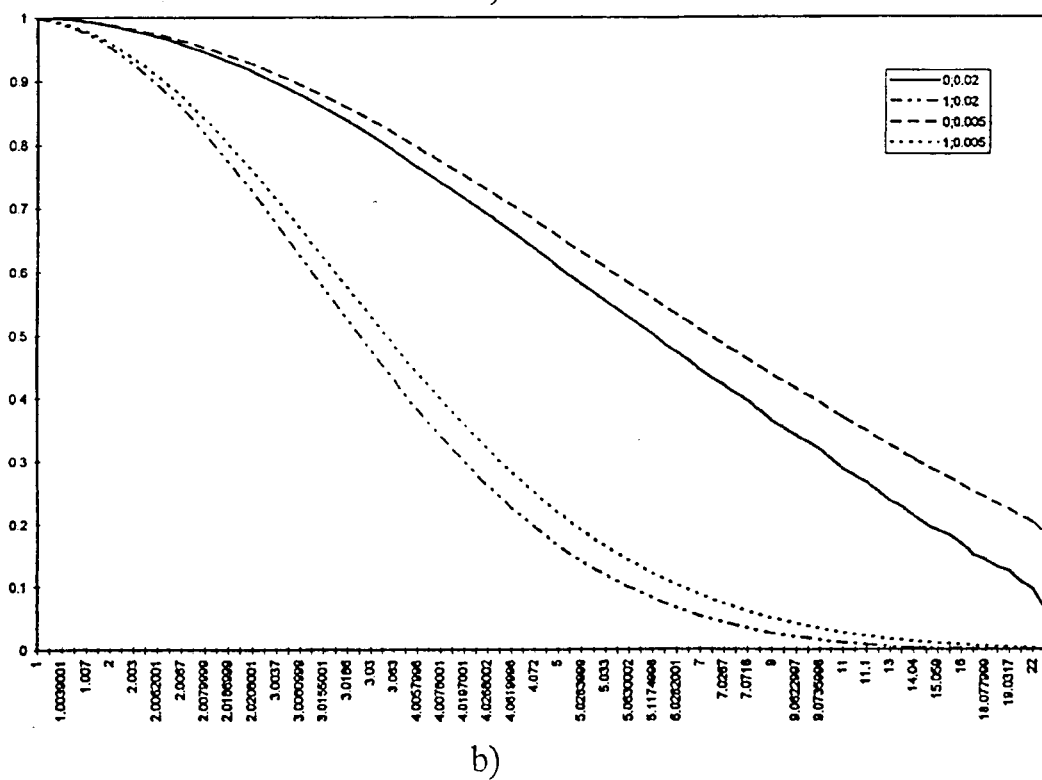
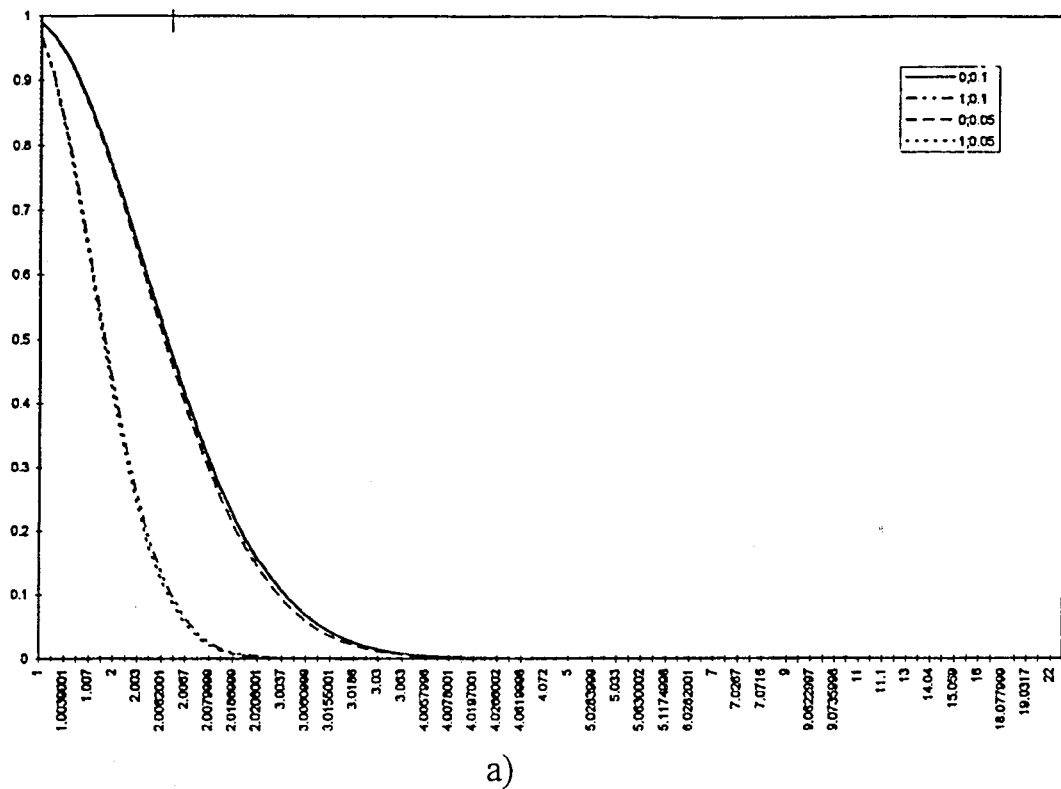
$p = .0217$

Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação exponencial rug(t) (modo de avaria 5)
Tabela 4.17

As figuras 4.10 e 4.11 representam alguns dos resultados obtidos para esta situação. Todos os gráficos apresentados nas figuras 4.10 a 4.19, inclusive, têm como abcissa o tempo de sobrevivência, em dias.



$\ln(-\ln(r(t)))$ para vib25 e aproximação exponencial (modo 4)
Figura 4.10



a) modo 1 b) modo 4
 Fiabilidade para vib25 e aproximação exponencial rug(t)
 Figura 4.11

Na figura anterior, os padrões a que se referem as legendas apresentam valores para as covariáveis dum e vib25, por esta ordem.

4.3.8.3 - Vibração a 25 Hz e aproximação linear

As tabelas 4.17 a 4.21 representam os resultados da rotina 2L para esta situação, conforme o que se referiu em 4.3.8.2, e as figuras 4.12 e 4.13 apresentam graficamente alguns resultados da corrida do programa Basic tomando como base os coeficientes de regressão encontrados por 2L e os padrões definidos para as covariáveis máquina (dum) e vibração (vib25), por esta ordem.

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.1256	1.1306	.9956	3.0822
vib25	4.9086	4.0567	1.2100	135.4444
rug	-.4262	.5365	-.7945	.6530

$$p = .3759$$

Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação linear rug(t) (modo de avaria 1)

Tabela 4.18

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	.6818	1.0833	.6294	1.9775
vib25	3.4464	2.0149	1.7105	31.3881
rug	1.4104	1.7724	.7957	4.0975

$$p = .2135$$

$$\text{Nota: } rug(t) = 52.9 * vib25 * (-.05 * t + 1.51)$$

Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação linear rug(t) (modo de avaria 2)

Tabela 4.19

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.7768	.8914	1.9933	5.9108
vib25	5.2861	4.8471	1.0906	197.5721
rug	-.1654	.5009	-.3301	.8476

$$p = .0011$$

$$\text{Nota: } rug(t) = 52.9 * vib25 * (-.07 * t + 2.11)$$

Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação linear rug(t) (modo de avaria 3)

Tabela 4.20

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.2922	.4872	2.6525	3.6409
vib25	1.1853	.6102	1.9425	3.2718
rug	.4628	.5209	.8826	1.5886

$p \approx 0$

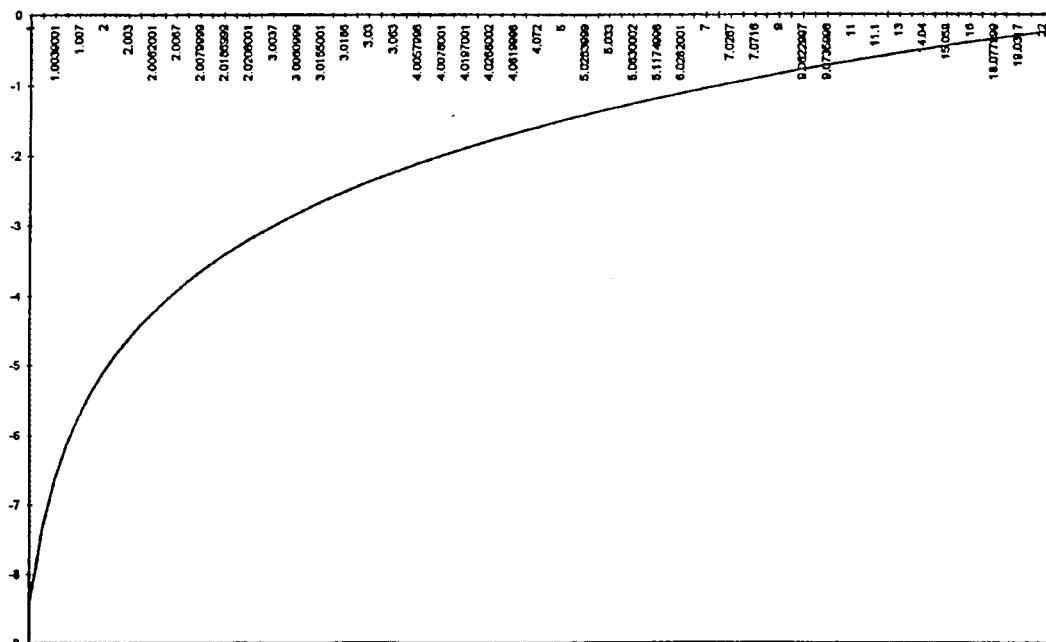
Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação linear rug(t) (modo de avaria 4)
Tabela 4.21

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.746	.7316	2.3866	5.7318
vib25	4.2496	3.2991	1.2881	70.0795
rug	-.2114	.4210	-.5020	.8095

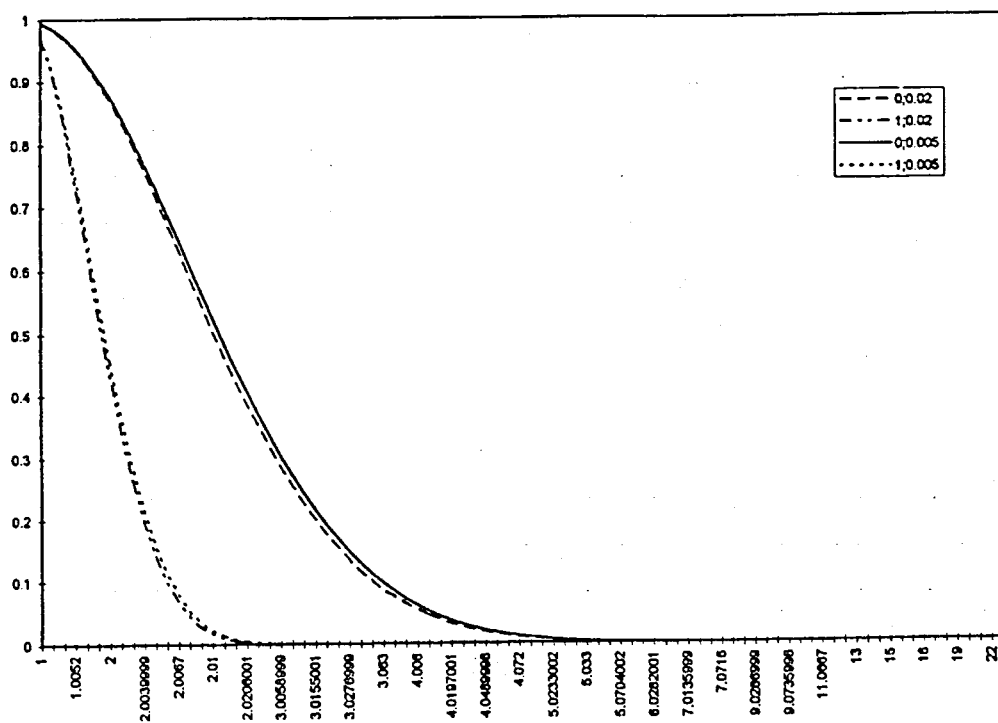
$p = .0197$

Nota: rug(t) = 52.9*vib25*(-.05*t+1.66)

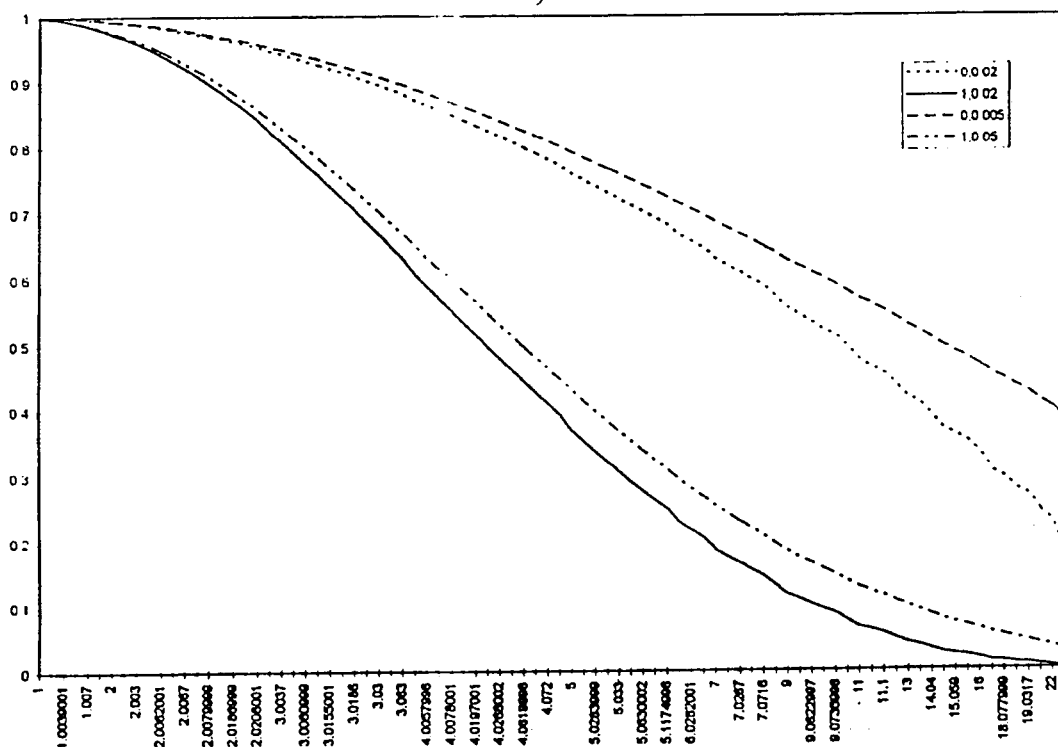
Resultados da corrida de 2L
para vib25 e relação linear rug(t) (modo de avaria 5)
Tabela 4.22



$\ln(-\ln(r(t)))$ para vib25 e aproximação linear (modo de avaria 4)
Figura 4.12



a)



b)

a) modo 3 b) modo 4
 Resultados da corrida de 2L
 para vib25 e aproximação linear rug(t)
 Figura 4.13

4.3.8.4 - Vibração a 50 Hz e aproximação exponencial

Com a variável referente à vibração de 50 Hz foi possível obter resultados para todos os modos de avaria.

As tabelas 4.22 a 4.26 apresentam os resultados referentes aos cinco modos de avaria considerados. A lógica de apresentação das figuras é a mesma que já tinha sido seguida nos casos anteriores com a figura 4.14 a apresentar $\ln(-\ln(r(t)))$ para o modo 4 e a figura 4.15 mostrando diferentes funções de sobrevivência ou fiabilidade para cada um dos modos de avaria apresentados. Nas legendas desta última figura, os padrões apresentam valores para as covariáveis máquina e vibração, por esta ordem.

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.0051	1.0888	.9231	2.7321
vib50	1.1577	.6167	1.8773	3.1827
rug	-.1545	.2429	-.6361	.8568

$$p = .4862$$

Resultados da corrida de 2L
para vib50 e relação exponencial rug(t) (modo de avaria 1)
Tabela 4.23

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	.5381	1.0653	.5051	1.7127
vib50	3.5284	1.3077	2.6982	34.0704
rug	.8794	1.0018	.8778	2.4094

$$p = .1987$$

Resultados da corrida de 2L
para vib50 e relação exponencial rug(t) (modo de avaria 2)
Tabela 4.24

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.4306	.8685	1.6472	4.1814
vib50	1.9010	1.0567	1.7990	6.6923
rug	.0201	.3036	.0662	1.0203

$$p = .0035$$

Resultados da corrida de 2L
para vib50 e relação exponencial rug(t) (modo de avaria 3)
Tabela 4.25

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.2269	.4815	2.5482	1.4108
vib50	.3850	.3311	1.1629	1.4696
rug	.1993	.2146	.9284	1.2205

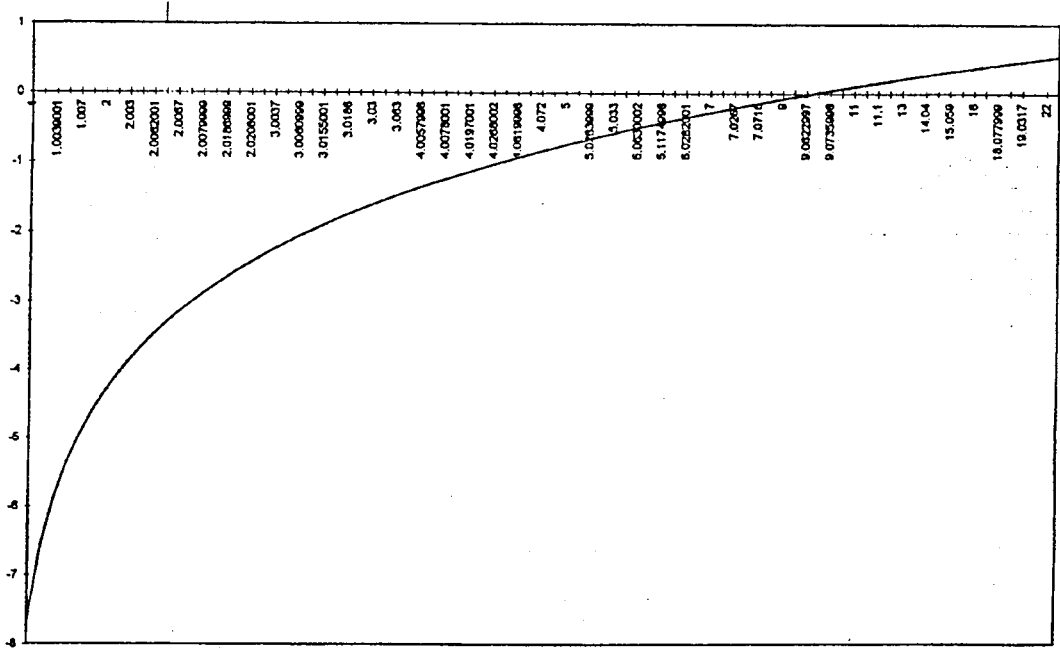
$$p = .0011$$

Resultados da corrida de 2L
para vib50 e relação exponencial rug(t) (modo de avaria 4)
Tabela 4.26

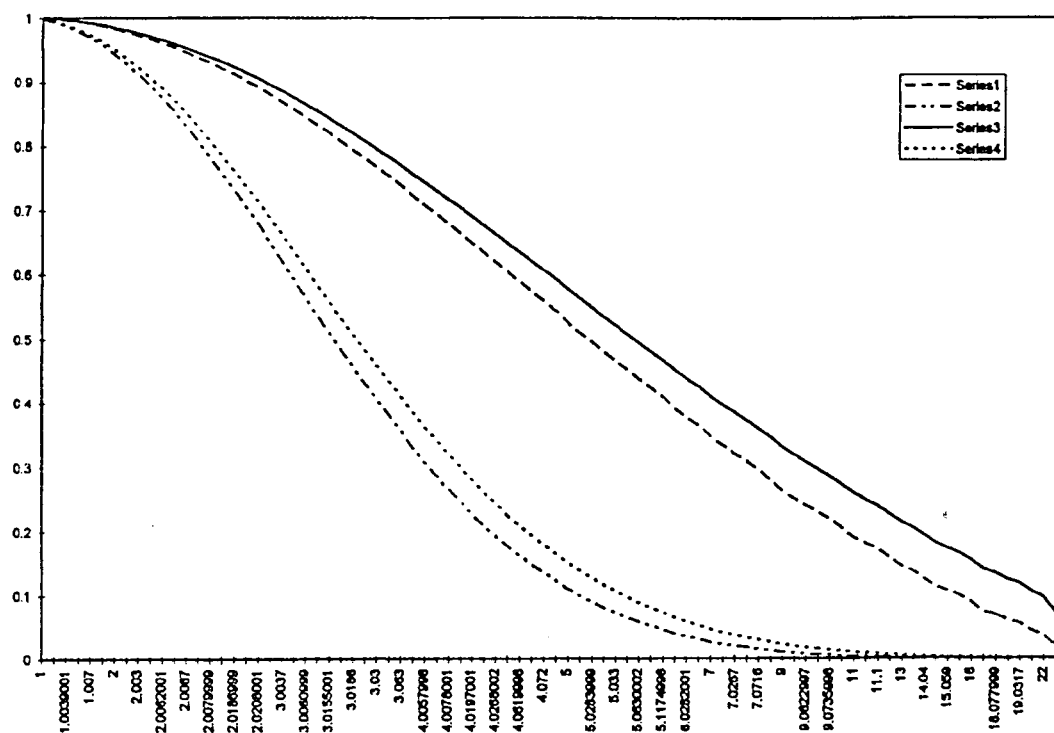
variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.6348	.7227	2.2622	5.1285
vib50	4.2517	3.5193	1.2081	70.2281
rug	-.0672	.1865	-.3602	.9350

$$p = .0246$$

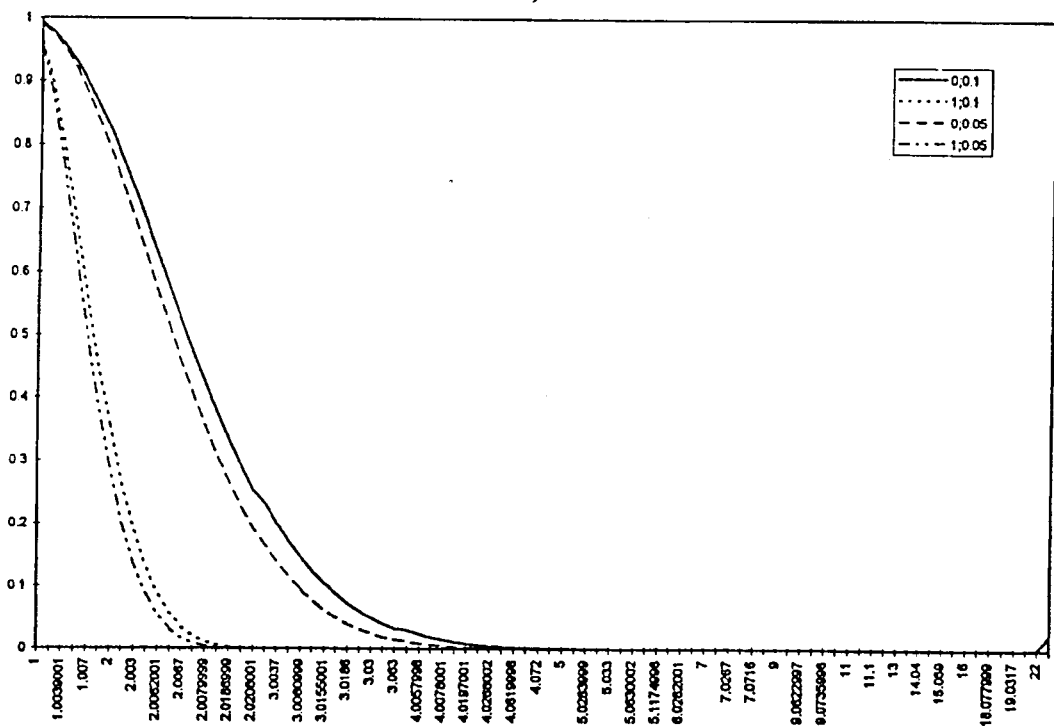
Resultados da corrida de 2L
para vib50 e aproximação exponencial rug(t) (modo de avaria 5)
Tabela 4.27



$\ln(-\ln(r(t)))$ para vib50
e aproximação exponencial rug(t) para o modo de avaria 4
Figura 4.14



a)



b)

a) modo 4 b) modo 5
 Fiabilidade para vib50
 e aproximação exponencial rug(t)
 Figura 4.15

4.3.8.5 - Vibração a 50 Hz e aproximação linear

A exemplo do que se fez em 4.3.8.4, apresenta-se nas tabelas 4.27 a 4.31 os resultados referentes à corrida da rotina BMDP 2L considerando a vibração à frequência de 50 Hz, agora para a aproximação linear, e para cada um dos cinco modos de avaria. As figuras 4.16 e 4.17 são equivalentes às figuras 4.14 e 4.15, respectivamente, mas agora considerando a vibração a 50 Hz. Mantêm-se válidas as observações então feitas quanto às legendas, neste caso aplicáveis à figura 4.17 e para o tempo, que, figurando em abscissas, continua expresso em dias.

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.0008	1.0966	.9127	2.7205
vib50	1.3704	1.1854	1.1560	3.9368
rug	-.2244	.2876	-.7803	.7990

$$p = .4228$$

Resultados da corrida de 2L
para vib50 e aproximação linear rug(t) (modo de avaria 1)

Tabela 4.28

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	.5225	1.0767	.4853	1.6862
vib50	1.4117	1.4038	1.0056	4.1029
rug	.2284	.5078	.4499	1.2566

$$p = .2027$$

Resultados da corrida de 2L
para vib50 e aproximação linear rug(t) (modo de avaria 2)

Tabela 4.29

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.4386	.868	1.6573	4.2147
vib50	8.3186	14.9387	.5568	4099.4328
rug	.0097	.3949	.0245	1.0097

$$p = .0035$$

Resultados da corrida de 2L
para vib50 e aproximação linear (modo de avaria 3)

Tabela 4.30

variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.2346	.4815	2.5640	3.4372
vib50	2.0392	1.9504	1.0455	7.6845
rug	.2516	.2856	.8809	1.2861

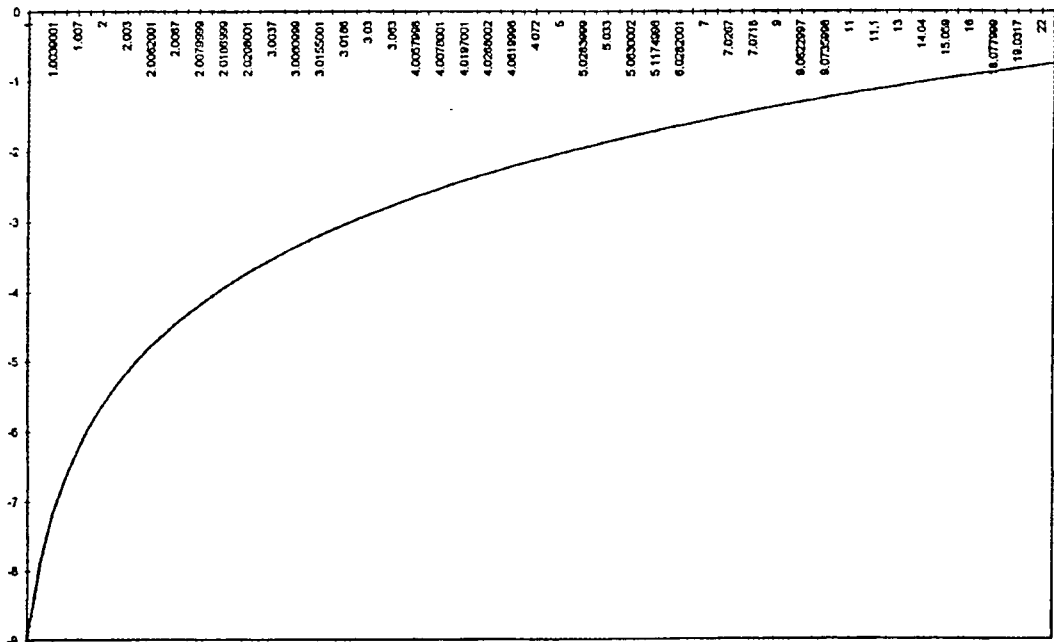
$p \approx 0$

Resultados da corrida de 2L
para vib50 e aproximação linear rug(t) (modo de avaria 4)
Tabela 4.31

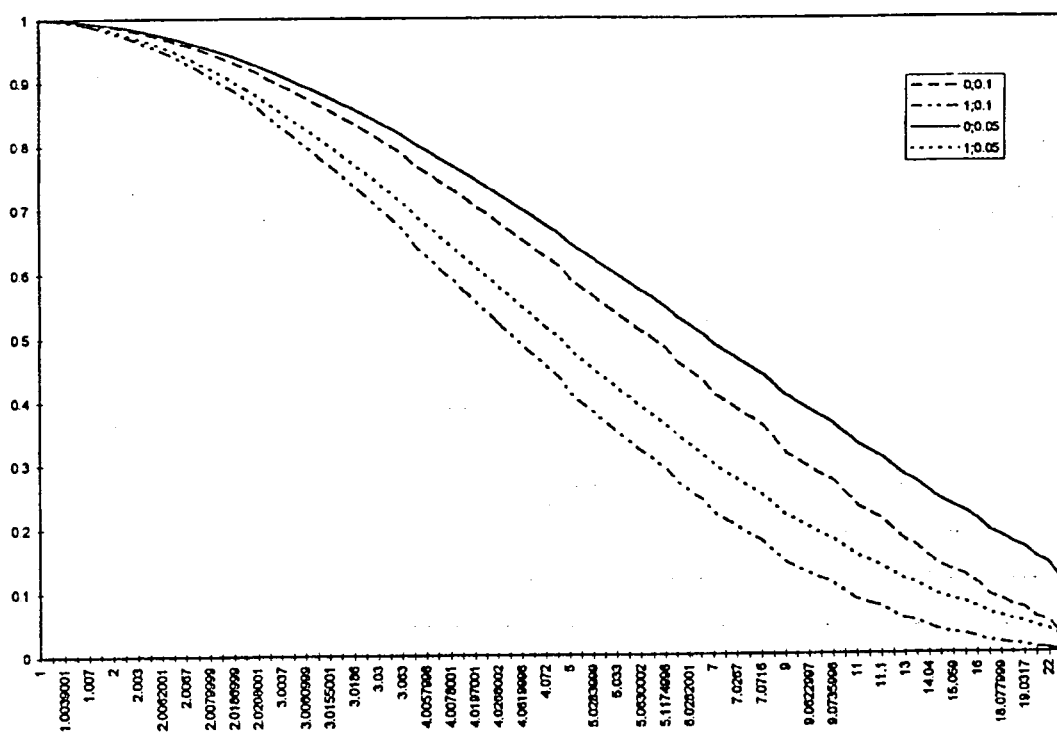
Variável	β	σ	β/σ	$\exp(\beta)$
dum	1.6517	.7231	2.2843	5.2161
vib50	11.0150	8.7365	1.2608	60781.7178
rug	-.1178	.2263	-.5206	.8889

$p = .0222$

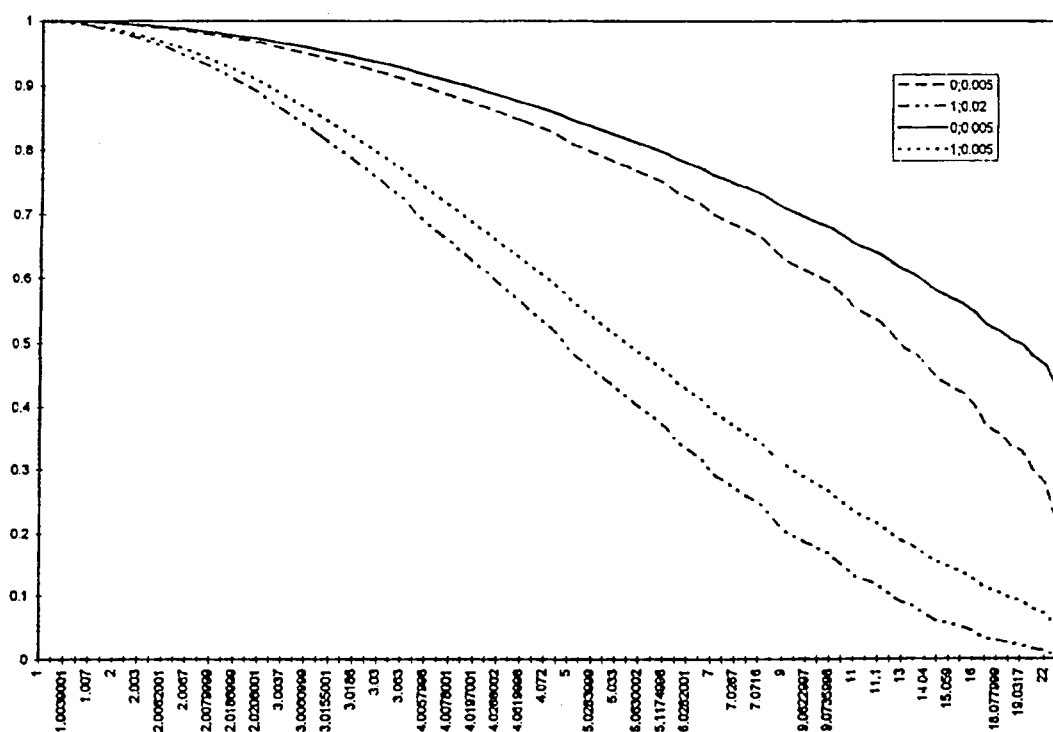
Resultados da corrida de 2L
para vib50 e aproximação linear rug(t) (modo de avaria 5)
Tabela 4.32



$\ln(-\ln(r(t)))$ para vib50
e aproximação linear rug(t) para o modo de avaria 4
Figura 4.16



a)



b)

a) modo 2 b) modo 4

Fiabilidade para vib50
e aproximação linear rug(t)

Figura 4.17

4.3.9 - Análise dos resultados

A análise dos resultados será feita em função dos parâmetros que foram avaliados neste subcapítulo 4.3, a máquina, o nível vibratório e a rugosidade. Tal como já se referiu em 4.2.7, outros parâmetros se poderiam ter considerado; porém, os motivos que levaram à sua não inclusão no modelo são exactamente os mesmos que aí se referiram pelo que não voltará a ser tratado este aspecto.

A opção, nesta situação, pela rugosidade é óbvia; com efeito, ao pretender equacionar a evolução com o tempo de sobrevivência não faria sentido utilizar a amplitude da rugosidade que se comporta numa situação, como as que estão em estudo neste capítulo como pouco menos que constante. É precisamente este facto que reforça a opção pela relação linear em detrimento da relação exponencial rugosidade vs. tempo de sobrevivência.

As considerações que se fizeram em 4.2.7, no que se refere ao modo de avaria 5, permanecem válidas aqui mas é curioso verificar que o efeito da não prioridade das intervenções motivadas pelo modo 5 não se faz sentir na rugosidade mas no nível vibratório.

Outro aspecto que interessa realçar, que neste caso se repercutirá em todos os parâmetros, é o efeito do reduzido número de casos de falha devidos a todos os modos de avaria que não o modo 4 na análise estatística; este facto leva a um aumento em termos absolutos e relativos dos erros de cálculo dos coeficientes de regressão para todos os parâmetros.

Começando pelo nível vibratório, verifica-se um efeito negativo do aumento do nível vibratório no tempo de sobrevivência qualquer que seja a opção para a relação entre a rugosidade e o tempo, exponencial ou linear e quer se considere o parâmetro de condição a 25 ou a 50 Hz. Esse efeito aparece mais nítido nos modos de avaria menos frequentes mas também se deve ter em conta que nesses modos os erros assumem maiores valores. Em relação a estes erros, refira-se a excepção que constitui o modo 2 na aproximação linear para o nível vibratório à frequência de 25 Hz, com um valor de $\beta = -7$ e um erro de 11.

Ainda quando se considera o nível vibratório a 25 Hz como parâmetro de condição, é interessante notar que os valores de β para todos os três parâmetros apresentam, para cada um dos parâmetros, valores da mesma

ordem de grandeza, para ambas as relações entre a rugosidade e o tempo. Isto para todos os modos, exceção feita ao modo 2 precisamente para o parâmetro vibratório, e modo a modo.

À frequência de 50 Hz a tendência é semelhante mas menos acentuado o paralelismo acima referido apenas no que se refere ao parâmetro de condição e para alguns modos de avaria (3, 4 e 5). No resto tal paralelismo continua válido, conforme se pode observar através da tabela 4.32 que condensa os resultados obtidos para os coeficientes de regressão β .

É também visível o efeito da máquina, sendo a máquina identificada como 1, código 1506, mais penalizante no que se refere a tempos de sobrevivência. Este resultado é, aliás, plenamente confirmado por todos os responsáveis da Renault, a nível de Manutenção e de Produção.

A nível da rugosidade, deve referir-se o efeito negativo do aumento deste parâmetro no tempo de sobrevivência relativo ao modo 4 e uma certa ambiguidade para o conjunto dos outros modos. Ressaltam ainda os valores relativamente pequenos em módulo para os coeficientes de regressão referentes à rugosidade a mostrar que o seu efeito quando tomado em conjunto com o do nível vibratório acaba por não ser muito grande.

modo	variável	exp	exp	linear	linear
		25 Hz	50 Hz	50 Hz	25 Hz
1	vib	4.0	1.0	1.4	4.9
	dum	1.0	1.0	1.0	1.0
	rug	-.30	-.15	-.22	-.40
2	vib	-7.0	3.5	1.4	3.5
	dum	.67	.54	.52	.68
	rug	1.0	.88	.22	1.4
3	vib	4.8	1.9	8.3	5.0
	dum	1.8	1.4	1.4	1.8
	rug	-.14	.02	.01	-.16
4	vib	.70	.39	2.0	1.2
	dum	1.3	1.2	1.2	1.3
	rug	.40	.20	.25	.40
5	vib	3.6	4.3	11	4.0
	dum	1.7	1.6	1.7	1.7
	rug	-.12	-.67	-.10	-.20

Resultados globais
Tabela 4.33

A situação que aqui foi estudada não deixa margens para escolha dos parâmetros pois pretendeu-se verificar a influência de todos eles no tempo de sobrevivência. Apesar disso, avaliou-se a significância de cada uma das covariáveis em relação ao tempo de sobrevivência recorrendo ao método MPLR (*maximum partial likelihood ratio*), disponível na rotina 2L e referido em BMDP (1992). Essa avaliação foi feita para o modo 4 e para rug50 e o resultado foi a consideração de todas as covariáveis como relevantes com a covariável referente à máquina a ser a última a entrar no modelo e a vibração a não sair sequer.

Tendo em atenção a maior dificuldade obtida na convergência para o modelo com a covariável de vibração a 25 Hz e o facto de essa mesma frequência não aparecer com uma definição tão nítida nos espectros e, até, no seu significado, parece também ser de optar por considerar a frequência a 50 Hz como a mais interessante das duas aqui consideradas.

4.3.10 - Validação dos resultados

De acordo com o que ficou dito em 4.2.8, a validação dos resultados foi levada a cabo, para as rectificadoras de balanceiros, a partir de novas medições realizadas expressamente para este efeito.

Os valores esperados foram os que resultaram da aplicação do modelo dos riscos proporcionais através dos resultados obtidos com a aplicação dos programas que figuram no Anexo IX deste trabalho.

A construção dos casos estatísticos seguiu o processo já descrito em 4.2.8, ou seja, realizaram-se novas medições e verificaram-se os tempos de sobrevivência que se observavam nas seguintes situações:

- para vibração a 25 Hz
valores do nível vibratório entre .01 e .03 (média .02)
- para a vibração a 50 Hz
valores do nível vibratório entre .03 e .07 (média .05)

Realizaram-se os seguintes passos:

- a) verificaram-se todas as observações existentes;

Nº total de observações 84

b) verificaram-se quais as observações com valores do nível vibratório entre os limites acima referidos:

- para 25 Hz
Nº de observações com $.01 < \text{vib}25 < .03$ 60

- para 50 Hz
Nº de observações com $.03 < \text{vib}50 < .07$ 45

c) para todas as observações referidas em b) foi possível definir perfeitamente o momento da ocorrência da 1ª falha após a medição porque, a partir daí as máquinas foram estando sob observação e não houve férias ou outras interrupções similares entretanto;

d) a comparação entre os valores reais e os previstos foi feita para cada um dos cinco modos de avaria. As tabelas 4.34 a 4.39 apresentam esses valores para as situações de vibração a 25 Hz, aproximação linear e exponencial, e 50 Hz, também linear e exponencial, respectivamente;

e) para cada frequência e para cada aproximação, efectuou-se um teste de qui-quadrado comparativo entre as frequências de ocorrência reais e as esperadas.

t	<2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	>7
modo 1	.65 39	.35 21	- 0	-	-	-	-
modo 2	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	1.0 60
modo 3	.57 34	.43 26	- 0	-	-	-	-
modo 4	.017 1	.15 9	.22 13	.23 14	.15 9	.033 2	.20 12
modo 5	.57 34	.43 26	- 0	-	-	-	-

Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados
para $\text{vib}25 = .02$ e aproximação linear $\text{rug}(t)$

Tabela 4.34

t	<2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	>7
modo 1	.57 34	.43 26	- 0	-	-	-	-
modo 2	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	1.0 60
modo 3	.50 30	.50 30	- 0	-	-	-	-
modo 4	.050 3	.25 15	.30 18	.23 14	.10 6	.017 1	.053 3
modo 5	.50 30	.50 30	- 0	-	-	-	-

Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados
para $\text{vib25}=.02$ e aproximação exponencial $\text{rug}(t)$

Tabela 4.35

A tabela 4.36 apresenta os valores reais distribuídos segundo as mesmas classes de frequência.

t	<2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	>7
freq. rel.	.017	.18	.23	.23	.13	.033	.17
freq.	1	11	14	14	8	2	10

Classes de frequência por tempos de sobrevivência
após observação de $.01 < \text{vib25} < .03$

Tabela 4.36

t	<2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	>7
modo 1	.58 26	.42 19	- 0	-	-	-	-
modo 2	.022 1	.089 4	.16 7	.20 9	.13 6	.044 2	.36 16
modo 3	.067 3	.38 17	.33 15	.18 8	.022 1	.022 1	- 0
modo 4	- 0	.089 4	.16 7	.18 8	.13 6	.044 2	.40 18
modo 5	.24 11	.64 29	.12 5	- 0	-	-	-

Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados
para $\text{vib50} = .05$ e aproximação linear $\text{rug}(t)$

Tabela 4.37

t	<2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	>7
modo 1	.53 24	.47 21	- 0	-	-	-	-
modo 2	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	1.0 45
modo 3	.29 13	.64 29	.067 3	- 0	-	-	-
modo 4	.044 2	.27 12	.31 14	.24 11	.067 3	.022 1	.044 2
modo 5	.71 32	.29 13	- 0	-	-	-	-

Classes de frequência por tempos de sobrevivência esperados
para $vib50 = .05$ e aproximação exponencial $rug(t)$
Tabela 4.38

A tabela 4.39 é semelhante à tabela 4.36.

t	<2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	>7
freq	.022	.089	.16	.18	.16	.022	.38
rel							
freq	1	4	7	8	7	1	17

Classes de frequência por tempos de sobrevivência
após observação de $.03 < vib50 < .07$
Tabela 4.39

A aplicação do teste do qui-quadrado faz-se segundo a expressão 4.1 comparando os valores das frequências amostrais esperadas para cada modo com as respectivas frequências amostrais observadas.

Assim, e considerando o valor crítico de qui-quadrado para seis graus de liberdade ($\chi^2_{99} = 16.8$; $\chi^2_{95} = 12.6$) porque se tem 7 categorias diferentes, podem-se alinhar os seguintes resultados:

-vib25

modo	1	2	3	4	5
exp	-	-	-	21	-
lin	-	-	-	.97	-



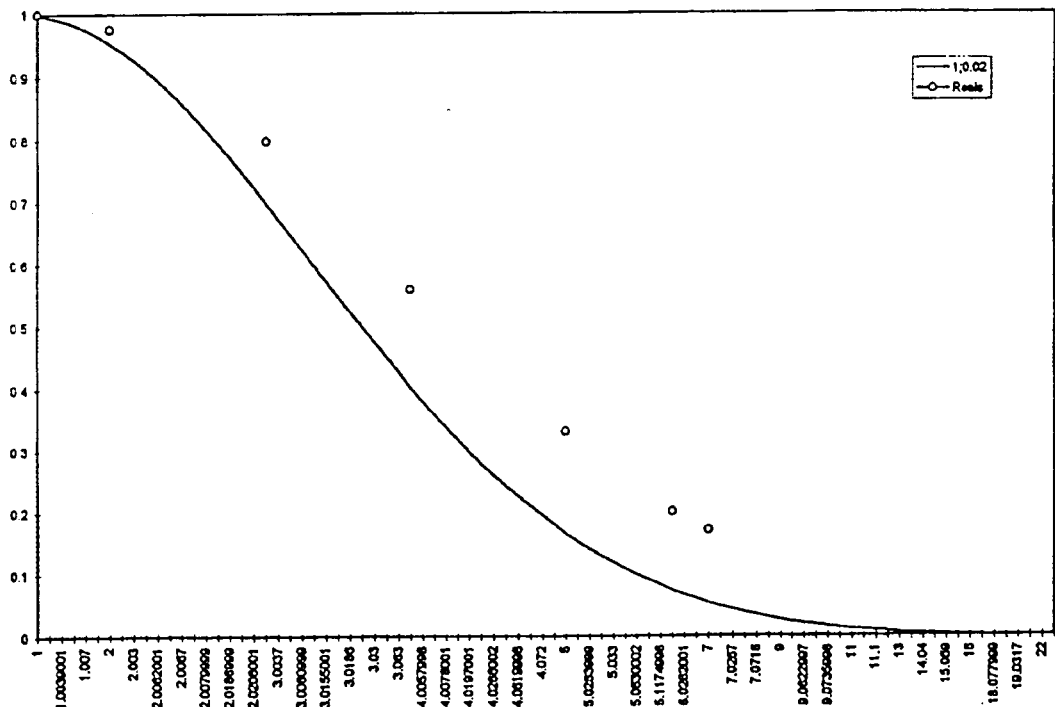
- vib50

modo	1	2	3	4	5
exp	-	-	-	128	-
lin	-	.84	-	.97*	-

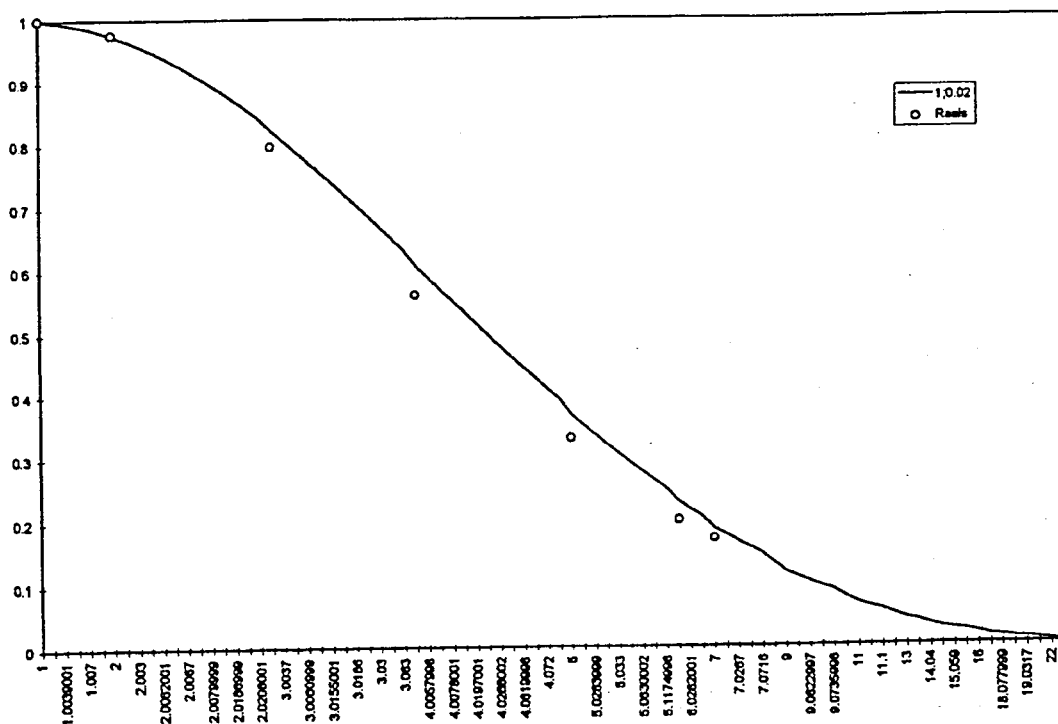
* - 5 graus (valores críticos de qui-quadrado de 15.1 e 11.1, respectivamente, para os percentis de .99 e .95)

Face a estes resultados pode-se concluir que o modelo apresenta uma boa concordância para a aproximação linear e para os níveis vibratórios medidos em ambas as frequências, 25 e 50 Hz, e que não há concordância razoável para a aproximação exponencial, mesmo para o modo de avaria 4 em qualquer das frequências. É, por isso, de rejeitar de imediato a aproximação exponencial. Como curiosidade aparece a concordância da aproximação linear a 50 Hz para o modo de avaria 2.

Para que se possam comparar melhor os resultados reais com os previstos pelo modelo, as figuras 4.18 e 4.19 comparam as fiabilidades esperadas com as reais, para o modo de avaria 4 em cada uma das frequências.

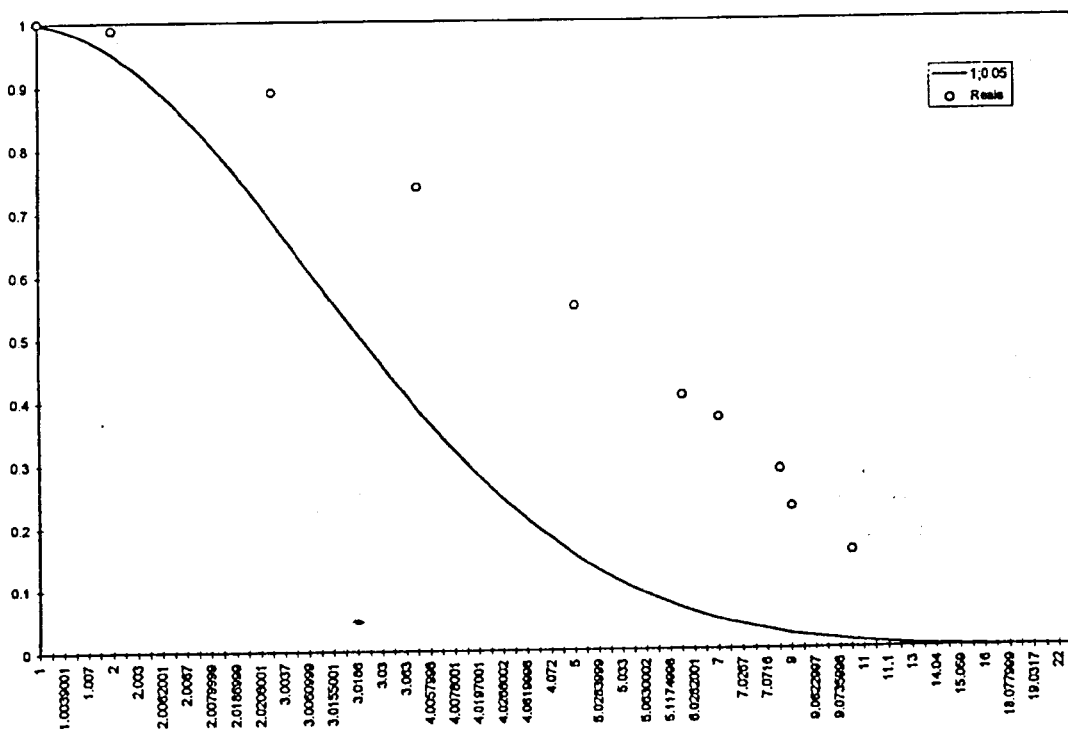


a) exponencial

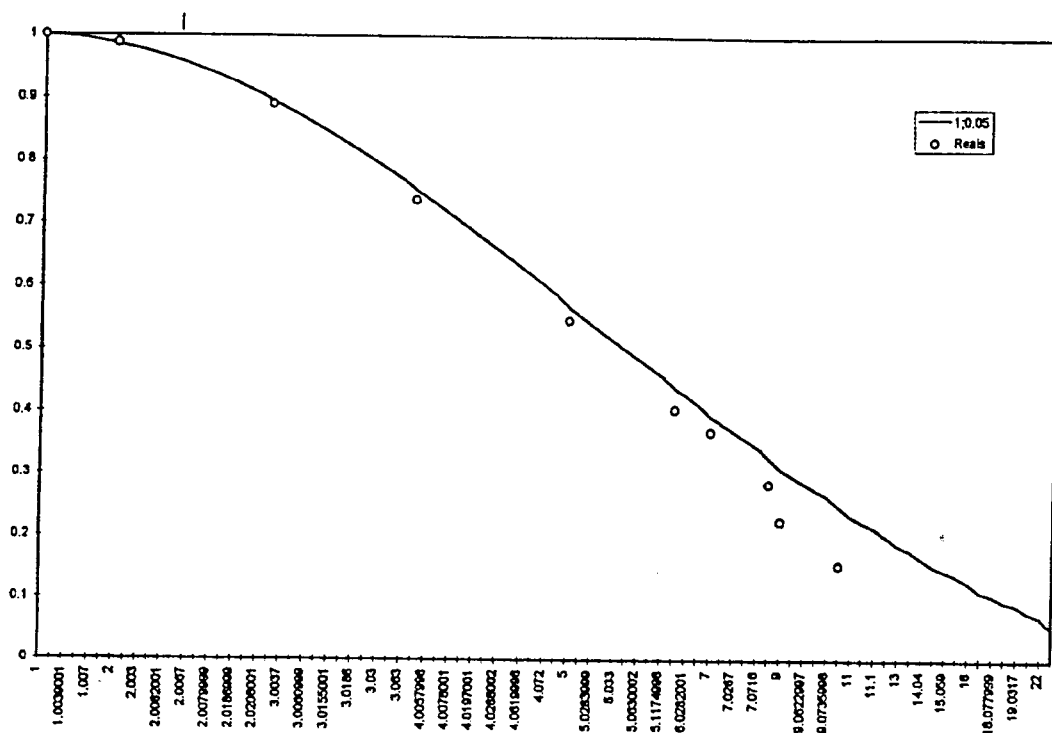


b) linear

Comparação entre valores esperados e reais da fiabilidade para vib25
Figura 4.18



a) exponencial



b) linear

Comparação entre valores reais e esperados da fiabilidade para vib50
Figura 4.19

Mais uma vez se lembra que nos gráficos das figuras anteriores, 4.10 a 4.19, a escala de abcissas representa o tempo em dias.

4.4 - Aplicação de um modelo de Taguchi

Após a aplicação do modelo dos riscos proporcionais, e tendo este conduzido à constatação de que ao fim de cerca de 6 dias de funcionamento há em geral uma falha, pode-se aplicar um modelo simples introduzido por Taguchi (1990) para avaliar o efeito da manutenção preventiva sobre a rugosidade do produto e para calcular um intervalo óptimo para essas acções preventivas, de forma a minimizar o custo de reparação e os tempos de paragem das máquinas.

Repare-se que a manutenção preventiva pode envolver duas áreas, a qualidade dos produtos obtidos e a redução da ocorrência de falhas. O

modelo de Taguchi aqui utilizado cobre o primeiro caso. Para modelos que cubram apenas o segundo deve-se consultar Jardine (1973).

O objectivo que se pretende é a obtenção de uma relação entre os valores dos limites funcionais e o tempo médio consumido antes que se produzam produtos com valores das propriedades iguais ou superiores aos limites funcionais.

Pretende-se aferir o valor limite de rugosidade recomendado em Renault (1987) com o intervalo óptimo de rugosidade resultante da aplicação de um modelo descrito em Taguchi (1990) e ainda proceder à comparação entre o intervalo de verificação actualmente utilizado e o intervalo de verificação óptimo resultante da aplicação desse mesmo modelo. Por outro lado, a aplicação deste modelo de Taguchi permite ainda comparar o tempo médio entre falhas previsto a partir da aplicação do modelo dos riscos proporcionais com o tempo médio entre falhas que o modelo de Taguchi aqui aplicado por sua vez prevê.

O modelo de Taguchi não vai ser aplicado na sua totalidade e há que ter em conta que no caso presente se procede à sua utilização num caso em que o desvio à propriedade se pode dar apenas para um dos lados, o da direita. Com efeito, a propriedade em causa é a rugosidade e não faz sentido que haja perda de qualidade à esquerda (à esquerda o limite é zero e a qualidade será tanto maior quanto menor for a rugosidade).

Considerem-se então os seguintes parâmetros, com a indicação dos valores que cada um deles toma no nosso caso entre parêntesis:

- Δ^* - limite funcional da propriedade (rugosidade)

$$(\Delta^* = 6)$$

- p - perda horária por não produção
($p = 10000$)

- t - tempo médio de reparação
($t = 2.5$)

- C - custo médio de manutenção
($C = 11000$)

- C^* - perda por falha devida a desvios superiores ao limite funcional

$$(C^* = 36000 = p.t + C) \quad (4.11)$$

A partir dos parâmetros acima indicados pode-se calcular o valor que a rugosidade deve apresentar para que se proceda a manutenção preventiva (Δ):

$$\Delta = \Delta^* \sqrt{\frac{C}{C^*}} 3^{\frac{1}{4}} \quad (4.12)$$

$$\Delta = 4.365$$

Verifica-se que o valor da rugosidade teórico a partir do qual deve ser interrompida a laboração deverá ser inferior ao considerado em Renault (1987).

Sejam agora considerados ainda os seguintes parâmetros:

- B - custo de inspecção

$$(B = 625 = \text{custo de inspecção/hora} * \text{tempo de inspecção} = 2500 * .25)$$

- u - intervalo médio de verificação

(u = 2 = nº mínimo de dias para verificar uma amplitude de rugosidade)

- Δ_0 - limite de manutenção em uso

$$(\Delta_0 = 2.5)$$

Vai-se calcular, para o caso das rectificadoras de balanceiros, o tempo médio entre falhas previsto pelo modelo de Taguchi aqui aplicado, u^* , e o intervalo de verificação considerado óptimo segundo o mesmo modelo, n:

$$u^* = u \frac{\Delta^*}{\Delta_0} \quad (4.13)$$

$$u^* = 4.8$$

$$n = u^* \sqrt{\frac{2B}{C}} \quad (4.14)$$

$$n = 1.62$$

Verifica-se que o tempo médio entre falhas previsto por ambos os modelos se aproxima e que o intervalo de verificação até agora utilizado pode continuar a sê-lo, embora se possa basear também na rugosidade e não apenas na sua amplitude.

4.5 - Conclusões

4.5.1 - Situação sem covariáveis dependentes do tempo

Neste capítulo, o modelo dos riscos proporcionais foi aplicado em duas situações distintas a quatro máquinas ferramentas utilizadas em fabrico em série que realizam dois ciclos de maquinação diferente, sempre os mesmos, duas a duas.

Dessas máquinas, aplicou-se o modelo dos riscos proporcionais sem covariáveis variáveis no tempo às duas que maquinam eixos, tendo sido consideradas como covariáveis a máquina propriamente dita e a amplitude da rugosidade das peças maquinadas.

Este tipo de aplicação já tem sido desenvolvido em trabalhos anteriores, verificando-se, uma vez mais, a capacidade do modelo dos riscos proporcionais para conduzir a resultados bastante fiáveis, pelo menos se comparados com os resultados reais, como se verificou em 4.2.8.

Aparece também como um factor a realçar, a relativa facilidade com que o modelo é aplicado nestes casos, depois de se ter procedido a uma escolha criteriosa dos parâmetros a introduzir como covariáveis. Com efeito, e atendendo aos pacotes informáticos existentes no mercado, torna-se simples e rápida a obtenção de resultados a partir de dados observados.

Já não se torna fácil, numa aplicação deste tipo, a compilação de um número suficiente de casos de falha para serem tratados estatisticamente. Este processo, para além de implicar uma análise criteriosa das variáveis em presença, a começar logo pelo tempo de sobrevivência, a escolha da escala de tempos, torna-se relativamente longo e, logo, caro.

Apesar do que se expôs acima, recomenda-se vivamente a aplicação do modelo sempre que haja vários parâmetros a avaliar em simultâneo e os custos de manutenção envolvidos o justifique.

Note-se, ainda no que respeita a concordância, o facto de o tempo ao fim do qual a fiabilidade desce abaixo de .6 ser próximo do tempo médio entre falhas - ver O'Connor (1992).

A terminar, é importante verificar que o modelo se aplicou a um conjunto relativamente vasto de modos de avaria e que estes, que não devem ser confundidos com as covariáveis nem utilizados como tal, acabam por se tornar um factor de complexidade em termos do tratamento da situação porque é a complexidade dos equipamentos que acaba por conduzir à proliferação dos modos de avaria tornando a análise destes um factor de custos adicional.

4.5.2 - Situação com covariáveis dependentes do tempo

Neste capítulo foi também aplicado o modelo dos riscos proporcionais com covariáveis dependentes do tempo. Este tipo de aplicação, que, para fins industriais, não se encontrou na literatura, merece que se tenham algumas considerações adicionais porque a sua aplicação nestas condições aparece com outro tipo de exigências.

O modelo foi aqui aplicado às outras duas rectificadoras, conforme referido em 4.5.1., que rectificam os chamados balanceiros, segundo um

ciclo de funcionamento diferente daquele com que as outras duas máquinas maquinam os eixos.

Um dos problemas que era pretendido resolver era o do relacionamento, que se revelou possível e adequado, entre as variáveis de condição e de qualidade dos produtos maquinados.

Aquela relação, se conseguida, é fundamental para o controlo das condições de serviço do equipamento, permitindo aos operadores e aos serviços de Manutenção prever o funcionamento desse equipamento a partir de qualquer um daqueles parâmetros, o de mais fácil acesso e, em conjugação com a utilização de covariáveis dependentes do tempo ou, mais geralmente, de uma relação de um deles com o tempo de funcionamento ou de sobrevivência, prever, através do conhecimento de um deles, a evolução do outro com o tempo.

A aplicação do modelo com covariáveis dependentes do tempo revelou-se, na situação aqui estudada, perfeitamente aplicável e conduzindo a resultados muito interessantes e fiáveis, pelo menos no que respeita ao principal modo de avaria, mas colocou alguns problemas, uns evitáveis no futuro, pelo menos nalgumas situações, e outros menos contornáveis, a saber:

- sendo uma utilização privilegiada deste modelo, com covariáveis variáveis no tempo, a contabilização de covariáveis de condição e de qualidade e aparecendo o nível vibratório como uma das mais generalizadas variáveis aferidoras da condição do equipamento, é importante que a definição das condições às quais o nível vibratório é contabilizado se faça de um modo mais expedito, implicando menos tempo e menos meios para proceder à sua análise;
- a recolha de dados tem que ser feita durante um período necessariamente longo de modo a que se possa compilar um número de casos de sobrevivência estatisticamente significativo. Aparece como factor desfavorável a existência de um grande número de modos de avaria, pelo que é de investir bastante na análise destes, e como factor favorável um tempo de sobrevivência curto entre avarias;
- o tempo de sobrevivência curto entre avarias, se é um factor favorável para a compilação de casos de sobrevivência, é, contudo,

bem desfavorável quando se pretende considerar qualquer covariável dependente do tempo, pelo que, assim, se torna sempre mais morosa a aplicação do modelo nestas condições porque tempos entre falhas longos deverão conduzir a melhores resultados;

- entre as covariáveis dependentes do tempo que tempos mais longos entre falhas permitirão aferir constará necessariamente, numa futura aplicação, o nível vibratório; isto irá conduzir a um modelo com mais covariáveis variáveis no tempo e maiores problemas de convergência;
- a convergência do modelo torna-se mais difícil de obter podendo conduzir a problemas de compatibilização entre condições fronteira, regressão estatística de covariáveis com o tempo e convergência do método de Newton-Raphson; nestas condições, deverá começar-se por adaptar a expressão obtida sacrificando a regressão estatística;
- os pacotes informáticos existentes no mercado nem sempre contemplam completamente a situação de covariáveis dependentes do tempo, como é o caso da rotina BMDP 2L, que, para esse caso apenas calcula os coeficientes de regressão, tornando-se mais dispendiosa a aquisição de um pacote que inclusivamente ofereça a representação gráfica das funções de fiabilidade ou de risco;
- a necessária construção de um programa informático capaz de complementar um pacote do tipo da rotina BMDP 2L para a utilização com covariáveis variáveis no tempo.

Apesar de algumas dificuldades adicionais, o modelo revelou-se eficaz, foi possível obter a convergência para todas as situações, embora com algumas variações pontuais, e convergiu para valores muito bons no modo de avaria 4 ficando aquém nos outros modos por deficiência no número de casos de falha que foi possível recolher. Note-se, contudo, que, por exemplo, o modo de avaria 5, não está directamente relacionado com a maquinação das peças.

Adicionalmente, é de referir que o tempo ao fim do qual a fiabilidade desce abaixo de .6, para o modo 4, também é próximo do tempo médio entre falhas.

A finalizar, e no que se refere à aplicação que foi levada a cabo, há a concluir:

- deve ser utilizada a aproximação linear $\text{rug}(t)$;
- deve entrar-se em linha de conta com as covariáveis máquina, vibração e rugosidade.

Face ao exposto, recomenda-se a simplificação da definição das covariáveis e a continuação da utilização do modelo dos riscos proporcionais que apresenta inegáveis potencialidades nas aplicações com fins industriais nos quais, atendendo a que muitos processos são já controlados em contínuo facilitando a utilização com covariáveis variáveis no tempo. No capítulo 5 continuarão a ser tecidas considerações sobre a utilização do modelo dos riscos proporcionais.

Foi aplicado também, para as rectificadoras de balanceiros, um modelo de Taguchi de optimização das intervenções de Manutenção. Podemos considerar que esse modelo forneceu, em relação aos prazos óptimos de intervenção, resultados que não contradizem os resultados previstos pelo modelo dos riscos proporcionais, tendo em atenção que se utilizaram, tanto quanto possível, os dados reais existentes.

Um resultado importante da aplicação daquele modelo de Taguchi é o que aponta para a interrupção da produção quando se atinge o valor 5 de rugosidade e não 2.5 de amplitude ou 6 de rugosidade máxima, como actualmente se pratica ou como era inicialmente imposto, respectivamente.

Igualmente importante, a confirmação dos valores do tempo médio entre falhas e do intervalo de verificação, previstos pelo mesmo modelo, embora neste caso coincidentes com os valores reais e/ou com os valores previstos pelo modelo dos riscos proporcionais.

5 - Procedimentos a adoptar para a aplicação do modelo dos riscos proporcionais

5.1 - Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma metodologia a seguir com vista à aplicação do modelo dos riscos proporcionais a equipamentos mecânicos.

Apresenta-se, numa perspectiva de utilizador, uma sequência de fases que pode ser utilizada quando se encara a possibilidade de aplicar o modelo dos riscos proporcionais e, após isso, se decide pela sua utilização.

Pensamos que, apesar de algumas limitações, suficientemente expressadas nas conclusões dos capítulos 4 e 6, o modelo dos riscos proporcionais pode ser aplicado com vantagens significativas em diversas situações industriais. Importa, por isso, que o venha a ser de forma cada vez mais expedita.

Com vista à aplicação do modelo na indústria torna-se necessário que os procedimentos a adoptar possam ser sistematizados de uma forma eficiente e suficientemente simples e prática. É com estes pressupostos que se apresenta em 5.2 o conjunto de procedimentos que se seguem.

5.2 - Esquema sequencial de procedimentos para aplicação do modelo dos riscos proporcionais

Viu-se em 2.9 quais as condições que deverão ser verificadas para que se possa aplicar com algumas vantagens o modelo dos riscos proporcionais.

Agora, o que se pretende é a definição, de forma prática e tendo em vista o utilizador do equipamento, do conjunto de acções a desenvolver a partir do momento em que se tomou a decisão de aplicar o modelo.

Assim, para aplicação do modelo, propõe-se a seguinte sequência de acções:

a) - Selecção das covariáveis

Pode-se começar por definir todos os parâmetros que tiverem sido identificados como tendo uma influência não desprezável nas situações de falha deixando para uma fase posterior testes de independência linear e/ou de significância estatística.

Assume particular importância a escolha criteriosa das covariáveis. Quando se fala em influência não desprezável, deve-se, ter em atenção o que se entende como não desprezável e que isso vai depender em muito dos valores relativos das influências dos diferentes parâmetros no comportamento do equipamento. Tenha-se em atenção que quando se modela uma situação, por mais simples ou complexo que seja o modelo, há sempre factores que são desprezados.

Uma outra situação a ter em conta é quase inversa da anterior. Posuindo o modelo dos riscos proporcionais boas capacidades para a consideração ou não de qualquer tipo de parâmetro (covariável), pode-se optar à partida pela não introdução no modelo de um dado parâmetro que, embora identificado, não assuma um carácter eminentemente técnico ou dependa de condições facilmente modificáveis.

Note-se que nesta fase poderá haver necessidade de proceder a um conjunto mais ou menos complexo de tarefas com vista à definição do valor mais característico de um dado parâmetro (ver 4.3 a propósito do nível vibratório). Sempre que possível é conveniente evitar essas situações.

Recomendou-se em 2.9 que se encarasse a aplicação do modelo apenas nas situações em que a complexidade do equipamento ou a sua criticidade o justificassem. Esta justificação depende dos custos envolvidos quer em termos de capital investido quer em termos de custos imputáveis a perdas de produção. Note-se, contudo, que o facto de se estar a trabalhar com equipamentos críticos não significa necessariamente que o número de covariáveis tenha de ser maior. Já

se deu anteriormente o exemplo das bombas centrífugas de menor envergadura. Repare-se, a esse propósito, quantas covariáveis, não seria possível encarar, caso a aplicação do modelo a esse tipo de equipamentos fosse recomendável: caudal, pressão na aspiração, alinhamento e/ou equilibragem prévios, nível vibratório, material do impulsor, anéis de desgaste (existência ou não, novos ou não...)...

b) - Levantamento das situações de falha verificadas

Há que proceder ao levantamento das datas em que cada falha teve lugar e, em seguida, identificar de que tipo de falha se tratou, ou seja, que tipo de situação ocorreu (perda de qualidade, interrupção do funcionamento ou funcionamento deficiente, etc.).

Novamente se podem tecer várias considerações. Obviamente, e tratando-se de um modelo estatístico, é de toda a conveniência que exista um número de casos de falha o maior possível. Contudo, e atendendo às potencialidades da utilização do modelo com covariáveis variáveis no tempo, para que essa variação possa ter lugar de forma contabilizável, é necessário que os intervalos entre falhas tenham um tempo mínimo. A conjugação destes dois factores pode levar a que a obtenção da amostra para tratamento se prolongue por um período de tempo incomportável, seja em termos económicos seja em termos de oportunidade do estudo.

c) - Identificação dos modos de avaria

A partir do conhecimento da constituição dos equipamentos e do seu modo de funcionamento e a partir, também, do tipo de falhas verificado, há que proceder à identificação dos modos de avaria, ou seja, definir quais as causas da falha ou qual ou quais os componentes que, por funcionamento deficiente, as provocaram.

A uma mesma falha poderão corresponder diversos modos de avaria.

A identificação dos modos de avaria não tem como objectivo, de forma geral, que estes sejam considerados como covariáveis mas, sim, que se possam classificar e proceder à censura dos diversos casos em função dos modos de avaria identificados.

A identificação dos modos de avaria é uma tarefa para a qual é necessário existir um arquivo histórico das intervenções de

manutenção sobre o equipamento em estudo. A este respeito, refira-se que são intervenções de manutenção todas as operações realizadas sobre os equipamentos e que tenham em vista alterar as suas condições de funcionamento. Isto inclui as operações de nível 1, pelo que o "histórico" poderá não se limitar aos serviços de manutenção.

Terão que ser tidas em conta, interessando esta questão para as alíneas b) e c) aqui expressas, aquelas intervenções que, alterando as condições de funcionamento, alterem consequentemente os valores de quaisquer covariáveis consideradas na aplicação do modelo.

d) - Escolha da escala de tempos

A escala de tempo a utilizar é um factor fundamental na aplicação do modelo dos riscos proporcionais. Basicamente, e para além de outros factores, a considerar pontualmente em função da situação em estudo, o problema que se coloca é o da possibilidade de, ao arrancar após a falha, os valores de algumas covariáveis não serem sempre os mesmos, ou seja, a intervenção de manutenção não deixa o equipamento sempre nas mesmas condições para arranque. Nesta situação, a cada caso, corresponde como valor de cada covariável não dependente do tempo o valor após o arranque porque é esse valor que vai determinar o tempo de sobrevivência.

Nesta fase torna-se extremamente importante que haja um número de tempos empatados relativamente pequeno e que os tempos de falha sejam suficientemente longos de modo a permitir detectar com exactidão se as covariáveis são constantes ou variáveis com o tempo (repare-se que esta foi uma condição que não se verificou de modo satisfatório nos casos estudados em 4).

A solução mais simples e segura para o "desempate" é sempre a adição de tempos da ordem de grandeza, no máximo, da centésima parte do tempo real, gerados de forma aleatória.

Tem-se referido várias vezes que os modos de avaria não devem ser considerados, de forma geral, como covariáveis. No entanto, e já que se está a abordar o problema da escala de tempos, refira-se que, no caso muito particular no universo das aplicações possíveis, de se pretender averiguar do efeito dos diferentes tipos de avaria nos tempos de reparação, poderão os modos de avaria ser encarados

como covariáveis. Nesta situação, a função fiabilidade deverá ser encarada como a probabilidade de a reparação subsequente demorar um determinado tempo, sendo a situação tanto mais desfavorável quanto maior for essa probabilidade. Será um caso a estudar através da inclusão de covariáveis mudas no modelo.

e) - Atribuição dos valores das covariáveis

A esta fase corresponde o início da construção da base de dados a utilizar. Procede-se à construção de casos a partir dos dados que se possuem, obtidos durante um período relativamente longo do tempo de vida do equipamento. Assim, há que verificar datas de falha e arranque para atribuição de tempos de sobrevivência e valores das covariáveis utilizadas aquando de cada arranque.

O caso particular das covariáveis dependentes do tempo terá sempre que ter um tratamento especial. Na alínea i) tecem-se algumas considerações a este respeito.

f) - Casos censurados

Para além de outras, as duas situações mais comuns que conduzem à censura de um caso (o modelo comporta dados censurados e, portanto, os diferentes pacotes informáticos impõem uma variável para definição desta situação) são a interrupção da observação sem que tenha ocorrido uma falha e, para um dado modo, a ocorrência de falha devida a outro(s) modo(s).

g) - Independência linear

Verificação da independência linear das diferentes covariáveis entre si através de recurso a um teste de hipóteses, se tal for considerado necessário (ver Anexo VI).

h) - Significância estatística

Aplicação de um teste de significância, conforme, por exemplo, BMDP (1992) com a aplicação do modelo.

i)- Obtenção e análise dos resultados

Quando se pretendem utilizar covariáveis dependentes do tempo há ainda que realizar uma outra fase, a construção da expressão que caracteriza a dependência no tempo.

A utilização destas covariáveis poderá recomendar-se especialmente na ausência de controlo de uma dada variável pelo processo ou pelo controlo de qualidade. Realizam-se então medições directas e aguarda-se que ocorra, após cada medição, a primeira falha. Com um número razoável de casos pode obter-se uma expressão por regressão estatística.

Note-se que a covariável dependente do tempo também pode, para além do tempo, depender de outra(s) covariável(eis). Uma das vantagens da utilização deste processo é o estabelecimento da relação entre uma variável de condição e uma variável de qualidade.

O processo de construção pode variar mas, se não for determinístico, o método mais seguro de o obter é o da regressão estatística dependendo o tipo de aproximação da situação em estudo.

A mesma covariável pode ter diferentes variações no tempo consoante o modo de avaria que se estiver a considerar. Poderá considerar-se a mesma, ou aproximada, para todos os modos se a variação no tempo corresponder a uma degradação global característica de um modo principal ou preponderante sendo apenas interrompida, em certos casos, pela ocorrência de uma falha imputável a outro(s) modo(s).

Caso a situação anterior não ocorra, há que fazer uma aproximação para cada modo tomando, para isso, em conta apenas os tempos correspondentes a casos não censurados para esse modo.

6.3 - Conclusões

Neste capítulo procedeu-se a uma sistematização dos procedimentos a adoptar com vista à aplicação do modelo dos riscos proporcionais a equipamentos mecânicos a partir do momento em que se tiver encarado a hipótese da sua utilização. Pretendeu-se construir este conjunto de procedimentos à imagem da construção de um circuito de "ordem de trabalho" tal como este último é normalmente definido na preparação de trabalho em Manutenção.

Recomendando-se este método para aquelas situações em que se pretendam analisar vários parâmetros em simultâneo, deve-se ter de imediato a noção da quantidade de dados que é necessário possuir para que este modelo possa ser utilizado vantajosamente. A obtenção destes dados pode demorar alguns anos o que não deixa de constituir uma desvantagem para a sua utilização, principalmente nas situações em que existe urgência na obtenção dos resultados.

Este modelo permite o tratamento de covariáveis dependentes do tempo de sobrevivência e também permite a utilização de covariáveis que dependam do tempo e de outras covariáveis. Estas situações podem ser úteis na medida em que, para as variáveis dependentes, poderá não ser necessária a obtenção de um conjunto tão elevado de medições como as que seriam necessárias para as variáveis independentes - daí o recurso à regressão.

As situações anteriores vêm dificultar a convergência do modelo e a análise dos resultados pelo que limita a sua utilização diminuindo a respectiva rendibilidade - daí só se recomendar a sua utilização, em termos de engenharia de manutenção, em equipamentos que pelos seus custos o justifiquem.

Os resultados poderão conduzir à possibilidade de utilização do modelo com várias covariáveis mas numa situação de não simultaneidade, ou seja, poderão existir covariáveis que não possam ser utilizadas em simultâneo, embora haja interesse em verificar em separado o seu efeito. É o caso, por exemplo, de covariáveis linearmente dependentes entre si.

As diferentes fases do procedimento descrito dificilmente poderão ser levadas a efeito apenas por um técnico pelo que será vantajosa a formação de uma equipa de trabalho para efectuar todo o processo. Nessa equipa integrar-se-iam elementos ligados aos sectores de Manutenção, Qualidade e Produção.

6 - Conclusões

6.1 - Conclusões gerais

Este trabalho foi dividido em seis capítulos dos quais os dois primeiros trataram da introdução dos conceitos e técnicas utilizados, os dois seguintes da apresentação das situações estudadas e o quinto do enquadramento do modelo dos riscos proporcionais no conjunto dos modelos de fiabilidade e em termos da sua própria aplicação; o sexto capítulo apresenta as conclusões gerais, tendo em conta que as conclusões mais específicas foram apresentadas nos três capítulos anteriores, e as sugestões para trabalhos futuros.

No primeiro capítulo apresentaram-se os conceitos que não respeitam apenas ao modelo dos riscos proporcionais mas à Manutenção e à Fiabilidade de uma forma geral. Traçou-se também uma panorâmica da evolução destas duas disciplinas e apresentou-se uma revisão bibliográfica que teve como objectivo mostrar o que tem sido o desenvolvimento daquelas áreas nos últimos anos. Viu-se assim que, em termos de Manutenção, os anglo-saxónicos têm-se debruçado mais sobre os aspectos quantitativos e os modelos numéricos e os latinos sobre a organização; no que respeita à Fiabilidade, há uma grande predominância dos modelos paramétricos, nomeadamente pontuais.

No segundo capítulo introduziu-se o modelo dos riscos proporcionais e a sua formulação matemática, incluindo a utilização de covariáveis variáveis no tempo. A revisão bibliográfica versou aqui apenas os trabalhos que trataram especificamente deste modelo, nomeadamente no campo da engenharia, constatando-se que, apesar de estarem a aparecer com mais frequência nos últimos anos, não são abundantes. Verificou-se também que o modelo dos riscos proporcionais, que numa primeira fase interessou sobremaneira o sector médico, está agora a ter uma aplicação cada vez maior na engenharia.

Já no campo das aplicações, o terceiro capítulo versa a utilização do modelo no tratamento fiabilístico de um moinho autogéneo instalado numa unidade de tratamento de minério. Os resultados obtidos não puderam ser validados porque a instalação interrompeu entretanto o seu funcionamento mas a aplicação do modelo teve a vantagem de permitir avaliar o efeito de uma covariável não medida directamente, o enchimento, através do seu relacionamento com a potência consumida pelo moinho. Permitiu ainda verificar que a lógica que os resultados obtidos permitem supor está de acordo com o funcionamento do moinho e as regras que o regulam, como as conclusões a que nesse capítulo se chega (ver 3.6) referem.

Tanto a aplicação do modelo ao moinho como a aplicação às rectificadoras de balanceiros, tratada no quarto capítulo, recorrem à medição do nível vibratório desses equipamentos. A diferença residiu na forma de medição e na definição do valor característico da covariável. Isto porque, enquanto no caso do moinho se mediu directamente o nível global, no caso das rectificadoras, devido às diferentes fontes de vibração em jogo, houve que realizar medições em frequência. Isso veio a implicar a definição de frequências características e, devido ao ciclo de funcionamento, a caracterização do momento em que, para essas frequências (25 e 50 Hz), se tomava o valor da amplitude vibratória.

A caracterização de valores acima referida e a utilização de covariáveis variáveis no tempo implicaram um acréscimo de complexidade e, até, de aumento dos erros cometidos que, pensamos, se deve tentar evitar o mais possível numa perspectiva de rentabilização da utilização do modelo. Contudo, tanto para a situação das rectificadoras de balanceiros, com a utilização de covariáveis variáveis no tempo, como para as rectificadoras de eixos, os resultados obtidos foram perfeitamente satisfatórios, como o provam os testes de validação de resultados que se efectuaram.

No caso da aplicação com covariáveis dependentes do tempo é de realçar os resultados mais próximos dos dados reais que se obtiveram com a utilização da aproximação linear por comparação com a aproximação exponencial que também foi testada. As expressões utilizadas resultaram, em ambos os casos, do recurso a regressão estatística, solução que se propõe sempre que não exista a hipótese de recorrer a uma relação determinística. Note-se que a regressão estatística pode obter-se a partir de dados fornecidos pelo processo ou a partir de medições expressamente realizadas para esse efeito.

Um dos maiores problemas na aplicação do modelo com covariáveis variáveis no tempo residiu na convergência. Como acima ficou exposto, procurou-se recorrer à utilização de expressões obtidas por regressão estatística. Para isso fez-se uso das rotinas BMDP 3R e 5R, conforme BMDP (1992), mas os coeficientes assim obtidos nem sempre se mostraram capazes de utilização directa. Quando isso aconteceu, procuraram-se outros valores para esses coeficientes (polinomiais ou exponenciais) tendo sido, mediante este processo, sempre possível encontrar uma solução convergente pelo que se propõe aqui o recurso a esse método. Mais ainda, os valores encontrados passíveis de fazer convergir o modelo pouco variaram em relação aos valores directamente obtidos. Note-se, contudo, que, conforme referido em 4.4, esta situação não acarreta qualquer problema porque não há necessidade, antes pelo contrário, de usar a mesma expressão para caracterizar a relação de uma dada covariável com o tempo para todos os modos de avaria.

No quinto capítulo enquadra-se o modelo dos riscos proporcionais no conjunto dos modelos de fiabilidade e propõe-se uma metodologia para a sua utilização que se recomenda quando:

- a) - há vários factores a influenciar a ocorrência de avarias;
- b) - há covariáveis não controladas directamente pelo processo;
- c) - há dados referentes ao conhecimento das máquinas que, devido à complexidade destas e por diversos motivos, o fabricante não forneceu aquando da aquisição e que devem ser verificados;
- d) - os valores envolvidos, de equipamento, de manutenção e de perdas por falha, são elevados.

O modelo dos riscos proporcionais, cujas aplicações devem continuar a ser investigadas, foi uma das maiores contribuições que, através da literatura da especialidade, é possível detectar no que respeita à inclusão de factores influenciadores de falhas nos equipamentos e dos seus efeitos relativos nos modelos de fiabilidade. Pena é que nessa mesma literatura o tratamento de dados de fiabilidade através deste modelo surja com tão pouca frequência.

6.2 - Interesse na aplicação do trabalho

A investigação desenvolvida ao longo deste trabalho apresenta diversas vantagens, correspondentes às inovações que, de um modo ou de outro, se foram introduzindo.

Uma constatação que se deve fazer é a possibilidade de algumas dessas inovações poderem ser utilizadas com vantagem noutros contextos. É o caso do processo que conduziu à obtenção das expressões para o enchimento do moinho, no capítulo 3, e da regressão entre covariáveis e de covariáveis com o tempo, no capítulo 4.

Pensamos, portanto, que é vantajoso sistematizar aqui, o conjunto de processos que foram desenvolvidos ao longo do trabalho, segundo a ordem pela qual foram apresentados, para que melhor possam ser consultados e utilizados no futuro. Assim, ter-se-á:

- a) Consideração do enchimento como covariável no modelo referente ao moinho autógeno, sabendo-se que esta variável não é controlada pelo processo produtivo;
- b) Obtenção de situações de trabalho paralelas e homólogas entre dois moinhos autógenos semelhantes a partir de dados existentes e/ou publicados - ver capítulo 3 e Miettunen *et al* (1993);
- c) Regressão entre valores da carga de dois moinhos semelhantes para obtenção de todos os valores da carga de um deles correspondentes aos valores de enchimento existentes. Estes valores foram considerados paralelamente em situações homólogas (b));
- d) Consideração da relação enchimento vs. carga através de regressão e não apenas por representação gráfica de pontos;
- e) Utilização do enchimento no modelo dos riscos proporcionais como covariável de funcionamento de um moinho autógeno, conforme decorre das quatro alíneas anteriores;
- f) Consideração de uma relação entre covariáveis de condição e de funcionamento com vista à utilização de uma(s) ou de outra(s) para

aferição do estado do equipamento com vista à eventual interrupção preventiva do seu funcionamento;

g) Utilização de covariáveis dependentes do tempo no modelo dos riscos proporcionais numa aplicação de engenharia com vista à verificação da sua influência na fiabilidade das rectificadoras de balanceiros;

h) Execução de um programa de cálculo para saída dos valores da fiabilidade dos equipamentos a partir dos coeficientes de regressão do modelo dos riscos proporcionais calculados pela rotina BMDP 2L;

i) Validação dos resultados obtidos pelo modelo dos riscos proporcionais com covariáveis variáveis no tempo;

j) Validação relativa dos resultados do modelo dos riscos proporcionais através de recurso a um modelo de Taguchi com o qual se obtiveram resultados coerentes com os obtidos com a utilização do modelo dos riscos proporcionais;

l) Posicionamento do modelo dos riscos proporcionais em relação a outros modelos de fiabilidade com levantamento de vantagens e inconvenientes e exemplo de situações típicas para eventual utilização;

m) Sistematização dos procedimentos a adoptar com vista à utilização do modelo dos riscos proporcionais.

6.3 - Sugestões para trabalhos futuros

A realização deste trabalho deixa abertas novas perspectivas de desenvolvimento de investigação nesta área. Entre elas avultam:

a) - A utilização de várias covariáveis dependentes do tempo;

b) - De acordo com a), o aprofundamento da necessidade e da conveniência da utilização da covariável definidora do nível vibratório como variável no tempo. Com efeito, se nos casos aqui tratados tal não se justificava, não deixa de ser importante encontrar

situações em que os tempos de sobrevivência possam ser mais alargados e em que, durante esse período, se possa, de forma inequívoca, considerar uma variação do nível vibratório ao longo desse tempo (situações de fadiga, desgaste, deformação, etc). Pensamos que a consideração do nível vibratório como variável no tempo pode abrir novos campos de aplicação ao modelo;

c) - A aplicação a equipamentos mecânicos de outro tipo, de forma mais expedita, nomeadamente no que se refere a equipamentos dinâmicos inseridos em processos com grandes exigências na qualidade dos produtos obtidos;

d) - O estudo de processos que conduzem a uma cada vez maior rentabilização da aplicação do modelo.

Bibliografia

AEM

El Mantenimiento en España

Asociacion Española de Mantenimiento

Barcelona, 1990

AFNOR

Maintenance Industrielle

Paris, 1988

Aitkin, M. e Clayton, D.

The fitting of exponential, Weibull and extreme value distributions to complex survival data using GLIM

Applied Statistics, N° 29, pp. 156 - 163, 1980

Anderson, Ronald T. e Neri, Lewis

Reliability Centered Maintenance

Elsevier Applied Science, 1990

Ansell, J. I. e Phillips, M. J.

Practical Problems in the Statistical Analysis of Reliability Data

Applied Statistics, N° 38 - 2, pp. 205 - 247, 1989

Arslan, S. e Okulewicz, J.

The Statistical Monitoring of Mechanical Equipment

ESREL'93

Ascher, Harold e Feingold, Harry

Repairable Systems Reliability - Modeling, Inference, Misconceptions and their causes

Marcel Dekker, Inc.

New York, 1984

Aubrey, Donna J. e Rigdon, Steven
Goodness-of-Fit Tests for Power Law Processes
in Advances in Reliability
North-Holland
Amsterdam, 1993

Aven, Terje
Optimal Replacement of Monotone Repairable Systems
Reliability and Maintenance of Complex Systems
NATO Advanced Study Institute
Kemer, Antalya - Turkey, 1995

Baker, R. D.
Testing the Efficacy of Preventive Maintenance
Journal of Operational Research Society, vol. 42, n° 6, pp. 493-503, 1991

Baker, R. D. e Wang, W.
Developing and Testing the Delay-Time Model
Journal of Operational Research Society, vol. 44, n° 4, pp. 361-374, 1993

Baker, R. D. e Christer, A. H.
Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance
European Journal of Operational Research 73, pp.407-422
North-Holland, 1994

Baker, Rose
Maintenance Optimisation with the Delay Time Model
Reliability and Maintenance of Complex Systems
NATO Advanced Study Institute
Kemer, Antalya - Turkey, 1995

Baker, Rose D.
A Nonparametric Estimator of the Renewal Function
Computers Operational Research, vol. 20, n° 2, pp. 167-178, 1993

Becker, G.
Mixed Discrete and Continuous Markovian Models for Components and
Systems with Complex Maintenance and Test Strategies
Safety and Reliability '92
Copenhagen, 1992

Bendell, A. e Walls, L. A.
Exploring Reliability Data
Quality and Reliability Engineering International, 1, pp. 35 - 51, 1985

Bendell, A.
Proportional hazards modelling in reliability assessment
Reliability Engineering, 11, pp. 175 - 183, 1985

Berthiez
Rectifieuse plane RCM 160-6040 - Instructions d'Utilization
Saint-Étienne, 1987

Berthiez
Rectifieuse plane RCM 160-6039 - Instructions d'Installation
Saint-Étienne, 1987

Bloch, Heinz P.
Improving Machinery Reliability
Practical Machinery Management for Process Plants (vol 1)
Gulf Publishing Company
Houston, 1988

BMDP
BMDP Statistical Software Manual, Version 7.0, vol.2
University of California Press
Berkeley, 1992

BMDP
BMDP/Dynamic User's Guide
BMDP Statistical Software, Inc.
Los Angeles, 1993

Bohoris, G. e Leitão, A. L. F.
P. H. M. versus Two-sample Tests: A case study
Journal of the Royal Statistical Society (Series C), 1989

Bruel & Kjær
Master Catalogue / Electronic Instruments
B&K
Denmark, 1989

Bunday, B. D. e Lee, R. A.
The efficiency of a Textile Winding Process
Applied Statistics, N° 27, pp. 305 - 309, 1978

Carneiro, Rui M. P. Neves
Organization and Management of Maintenance and its influence on the
company's activity
Euromaintenance 92, Lisboa, 1992

Cannon, A. G. e Bendell, A.
Reliability data banks
Elsevier Applied Science
Londres, 1991

Chatfield, Christopher
Statistical Inference regarding Markov chain models
Applied Statistics, N° 22, pp. 17 - 20, 1973

Christer, A. H.; Wang, W.; Baker, R. D. e Sharp, J.
Modelling maintenance practice of production plant using the delay-time
concept
IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry 6, pp. 67-
83, 1995

Corder, A. S.
Maintenance Management Techniques
McGraw-Hill
Londres, 1976

Corral, Ignacio Ferrero
Utilizacion de ordenadores en el mantenimiento aeronáutico
6° Congresso Iberoamericano de Mantenimiento
Barcelona, 1991

Cox, D. R.

Regression Models and life-tables

Journal of the Royal Statistical Society, B 34, pp. 187 - 220, 1972

Cox, D. R. e Snell, E. J.

A General Definition of Residuals

J. R. Statistic Society, B, nº 30, pp. 248 - 275, 1968

Craveiro J. T.

Interacção do Controlo de Condição num Sistema Integrado de Gestão da Manutenção Assistido por Computador

6º Congresso Iberoamericano de Mantenimiento

Barcelona, 1991

Craveiro, J. T.

A Manutenção e a Qualidade

Dirigir, Nº 16, pp. 75 -79, 1991

CSI - Computational Systems Incorporated

Wavepack User's Manual

CSI

Knoxville, 1989

CSI - Computational Systems Incorporated

Fonctions et Applications de Mastertrend

Le progiciel de Maintenance Prédictive de CSI

CSI

Knoxville, 1991

CSI - Computational Systems Incorporated

Guide to Purchasing CSI's Adapters, Accelerometers, and Analysers

CSI

Knoxville, 1991

CSI - Computational Systems Incorporated

Wavepak - Technical Specifications

CSI

Knoxville, 1992

CSI - Computational Systems Incorporated
Model 2115 Machinery Analyser
User's Manual
CSI
Knoxville, May 1992

Désir, Jean-Luc
How training Maintenance professionals improves plant productivity
Euromaintenance 92, Lisboa, 1992

Dohnal, Gejza e Antoch, Jaromír
Optimization in the Planning of Preventive Maintenance
Reliability and Maintenance of Complex Systems
NATO Advanced Study Institute
Kemer, Antalya - Turkey, 1995

Ebrahimi, N.; Habibullah, M. e Soofi, E. S.
The role of information theory in reliability analysis
in Advances in Reliability
North-Holland
Amsterdam, 1993

Eid, M. *et al.*
Common Mode Failure Modelling in Complex Systems using the
Differential Model for Equivalent Parameters
Safety and Reliability '92
Copenhagen, 1992

Farewell, V. T.
An application of Cox's proportional hazard model to multiple infection
data
Applied Statistics, N° 28, pp. 136 -143, 1979

Groenendijk, Wim
Maintenance Management Systems: Structure, Interfaces and
Implementation
Reliability and Maintenance of Complex Systems
NATO Advanced Study Institute
Kemer, Antalya - Turkey, 1995

Harjunpaa, Harri

How to determine the effectiveness of an industrial Maintenance organization and its influence on profitability of a company
Euromaintenance 92, Lisboa, 1992

Hickling, Phil

The use of cause-Consequence Diagrams for the Reliability Analysis of Sequentially Operating Systems
Safety and Reliability '92
Copenhagen, 1992

Ireson, W. Grant e Coombs, Clyde F.

Handbook of Reliability Engineering and Management
McGraw-Hill
London, 1988

ISO

Norme Internationale ISO 2372

Vibrations Mécaniques des machines ayant une vitesse de fonctionnement comprise entre 10 et 200 tr/s. Base pour l'élaboration des normes d'évaluation

ISO

Suíça, 1974

Jardine, A. K. S.

Maintenance, Replacement and Reliability
Pitman Publishing
Ontario, 1979

Jardine, A. K. S.

Operational research in Maintenance
Manchester University Press, 1973

Jelen, Frederic C. e Black, James H.

Cost and Optimization Engineering
McGraw-Hill, Inc.
Auckland, 1983

Jensen, Uwe
Stochastic Models of Reliability and Maintenance
Reliability and Maintenance of Complex Systems
NATO Advanced Study Institute
Kemer, Antalya - Turkey, 1995

Jones, Neil K. W.
Setting equipment Maintenance strategies in the 90's
Euromaintenance 92, Lisboa, 1992

Kalbfleish, J. D. e Prentice, R. L.
The Statistical Analysis of Failure Time data
John Wiley and Sons, 1980

Kay, R.
Proportional hazard regression models and the analysis of censored survival data
Applied Statistics, N° 26, pp. 227 - 237, 1977

Kelly, A. e Harris, M. J.
Simulation, an Aid to Maintenance Decisions
The plant engineer, N° 15, pp. 11 - 43, 1971

Kelly, A. e Harris, M. J.
Management of Industrial Maintenance
Newnes-Butterworths
Londres, 1977

Kelly, Anthony
The Uses and Limitations of Total Productive Maintenance
Maintenance, Vol. 7, n° 3, pp.3 - 13, September 1992

Klaasen, Klaas B.
System Reliability, concepts and applications
Edward Arnold
London, 1989

Krishnaiah, P. R. e Rao, C. R.

Quality Control and Reliability

North Holland - Handbook of Statistics, vol. 7

Amsterdam, Oxford, 1988

Kumar, D. e Esa, S.

Influence of Operating Environment on the Lifelength of Power Supply
Cables of Electrical Load-Haul-Dump Machines

ESREL'93

Kvam, P. H. e Samaniego, F. J.

On Maximum Likelihood Estimation based on Ranked Set Samples, with
Applications to Reliability

in Advances in Reliability

North-Holland

Amsterdam, 1993

Legát, Václav e Zaludova, Agnes H.

Optimization of Preventive Replacement

ESREL'93

Leitão, A. L. F. e Newton, D. W.

Proportional hazards modelling of aircraft cargo door complaints

Quality and Reliability Engineering Int., N° 5, pp. 229 - 238, 1989

Leitão, Armando L. F.

Proportional hazards methods in industrial reliability and maintenance

Phd dissertation, University of Birmingham, 1989

Leitch, Roy

Engineering Diagnosis: matching problems to solutions

I International Workshop on Functional Modeling

Ispra, Italy, 1993

Lindqvist, Bo e Tjelmeland, Hakon

An Exponential Regression Model for Censored Failure Data: Estimation
and Graphical Model Checking

10th Annual Symposium of the Society of Reliability Engineers,
Scandinavian Chapter

Stavanger, Norway, 1989

Lyonnet, Patrick
La maintenance - mathématiques et méthodes
Technique et Documentation - Lavoisier
Paris, 1989

Lyonnet, Patrick
Les outils de la qualité totale
Technique et Documentation - Lavoisier
Paris, 1991

Marshall, J. M.; Wightman, D. W. e Chester, S. J.
Proportional Hazards Analysis of Electric Component Reliability Data
11th advances in Reliability Technology Symposium
Liverpool, 1990

Miettunen, J.; Lahteenmaki, S. e Jamsa-Jounela, S. L.
New Methods for the Control of Autogeneous Grinding Circuit
XVIII International Mineral Processing Congress
Sydney, May 1993

MIIT
Implementação de um sistema de Manutenção por Controlo de Condição
em Pirites Alentejanas S. A.
MIIT, Pedip
Lisboa, 1992

Modarres, Mohammad
Functional Modelling of Complex Systems using a GTST-MPLD
Framework
I Workshop on Functional Modeling
Ispra, Italy, 1993

Morão, Rafael
How statistics can help textile industries
University of Leeds, 1967

Moreau, T.; O'Quigley, J. e Mesbah, M.
A global goodness-of-fit Statistic for the PHM
Applied Statistics, N° 34, pp. 212-218, 1985

Morgan, B. J. T.

Markov Properties of Sequences of Behaviours

Applied Statistics, N° 25, pp. 31-36, 1976

Nelson, William R.

A Functional Framework for System Design, Operation and Performance Assessment

I International Workshop on Functional Modeling

Ispira, Italy, 1993

Nunes, Nuno António Neves

Comportamento Dinâmico de Estruturas - Aquisição e processamento de sinais por meios computacionais

Tese de Mestrado - IST

Lisboa, 1990

O'Connor, Patrick

Practical Reliability Engineering

John Wiley and Sons, 1992

O'Reilly, Kenneth

Methods to evaluate Maintenance with positive results

Euromaintenance 92, Lisboa, 1992

Parmigiani, Giovanni

Scheduling Inspections in Reliability

in Advances in Reliability

North-Holland

Amsterdam, 1993

Perera, U. D.

Reliability Growth Models and Application to a Processor

11th Advances in Reliability Technology Symposium

Liverpool, 1990

Pereira, F. D.

Informatização da Manutenção - Parâmetros de caracterização do equipamento

6º Congresso Iberoamericano de Mantenimiento

Barcelona, 1991

Pereira, F. D.; Craveiro, J. T. e Nunes, N.

Humain resurces in Maintenance - a Portuguese experience

Euromaintenance 92, Lisboa, 1992

Petersen, Trond

Fitting Parametrical Survival Models with Time-Dependent Covariates

Applied Statistics, N° 35, pp. 281-288, 1986

Pettitt, A. N. e David, I. Bin

Investigating Time Dependence in Cox's Proportional Hazards Model

Applied Statistics, N° 39, pp. 313-329, 1990

Phillips, Michael J.

Estimation of the Mean Number of Failures for Repairable Systems

11th Advances in Reliability Technology Symposium

Liverpool, 1990

Price, Chris; Pugh, David e Hunt, John

Development of a multiple model design analysis system

III International Workshop on Functional Modeling

Maryland, USA, 1995

Qamber, Isa S. e Keller, A. Z.

A deveoped Transient-behaviour Method

11th Advances in Reliability Technology Symposium

Liverpool, 1990

Rapp, B.

Models for Optimal Investment and Maintenance decisions

John Wiley and Sons (1976)

Renault

MSP

Renault, 1987

Renault
Normalisation Équipement E29.95.010.R
Renault, 1994

Sacristán, Francisco Rey
Seguimiento de la disponibilidad operacional
6° Congresso Iberoamericano de Mantenimiento
Barcelona, 1991

Schjolberg, Per e Hunstad, Stale
Maintenance and availability in Norwegian industry
Euromaintenance 92, Lisboa, 1992

Schouten, Frank Van Der Duyn e Vanneste, Stephan
Two Simple Control Policies for a Multicomponent Maintenance System
Operations Research, vol. 41, nº 6, pp. 1125-1136, Nov.-Dec. 1993

Schouten, Frank Van Der Duyn
Maintenance Policies for Multicomponent Systems: An Overview
Reliability and Maintenance of Complex Systems
NATO Advanced Study Institute
Kemer, Antalya - Turkey, 1995

Seixas, Eduardo de Santana e Sosa, José M. Brunelli
Manutenibilidade: "A distribuição log-normal"
6° Congresso Iberoamericano de Mantenimiento
Barcelona, 1991

Shanthikumar, J. G.
Dynamic Modelling of Reliability Systems
Reliability and Maintenance of Complex Systems
NATO Advanced Study Institute
Kemer, Antalya - Turkey, 1995

Sherwin, D. J.
Inspect or Monitor? - How to choose Maintenance Policy by Matrix
Algebre
Comadem 89, Birmingham, 1989

Singpurwalla, Nozer D. e Soyer, Refik
Assessing the Reliability of Software: An Overview
Reliability and Maintenance of Complex Systems
NATO Advanced Study Institute
Kemer, Antalya - Turkey, 1995

Smith, C. S.
Quality and Reliability: an Integrated Approach
Sir Isaac Pitman and Sons, Ltd.
Londres, 1969

Soyer, Refik
Analysis of Software Failure Data
Reliability and Maintenance of Complex Systems
NATO Advanced Study Institute
Kemer, Antalya - Turkey, 1995

Srivastava, Jagdish N.
Some basic contributions to the theory of comparative life testing
experiments
in Advances in Reliability
North-Holland
Amsterdam, 1993

Sun, Kai e Basu, Asit P.
Characterizations of a Family of Bivariate Exponential Distributions
in Advances in Reliability
North-Holland
Amsterdam, 1993

Taguchi, Genishi; Elsayed, A. Elsayed e Hsiang, Thomas
Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção
McGraw-Hill
São Paulo, 1990

Usher, John S.
On the problem of masked system life data
in advances in Reliability
North-Holland
Amsterdam, 1993

Van der Mooren, A. L.
Maintenance Cost Estimation in Mechanical design and modification
Euromaintenance 92, Lisboa, 1992

Villemeur, Alain
Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment (Vol. 1) -
Methods and Techniques
John Wiley & Sons
Chichester, 1992

Worledge, D. H.
Industry Advances in Reliability Centered Maintenance
ESREL'93

Wowk, Victor
Machinery Vibration - Measurement and Analysis
McGraw-Hill
New York, 1991

Xie, M. e Zhao, M.
A practical approach for the analysis of software failure data
ESREL'93

Zhao, M. e Xie, M.
On Modelling and Estimation of Storage Reliability
Safety and Reliability '92
Copenhagen, 1992

Lista de símbolos

$A(t)$ - Disponibilidade

d_i - n° de unidades que falharam em t_i (2.5.2 e seguintes)

e_i - resíduo

f -função

frequência indicada (4.3.5)

$f(t)$ - função densidade de falha
probabilidade de falha em t

f_{amo} - frequência de amostragem

fr - frequência real

F - frequência (4)

$F(t)$ - função distribuição de falha
probabilidade de falha até t

$h(t)$ - taxa de risco

$H(t)$ - função de risco acumulado

$H_o(t)$ - função de risco base acumulado

i - variável de contagem

j - variável de contagem

k - variável de contagem -

l - variável de contagem a partir de i

L - verosimilhança

$L(\beta)$ - função de verosimilhança no modelo dos riscos proporcionais

n - nº de itens
intervalo de verificação óptimo (4.4)

N - variável de contagem

$N(t)$ - nº de avarias acumuladas ao longo do tempo

N_{pi} - nº de avarias de cada máquina

N_{pt} - nº de avarias total

P - elemento de Q

Q_i - conjunto de permutações

$R(t)$ - função fiabilidade
probabilidade de não falhar até t

S_i - soma de covariáveis

t - tempo de sobrevivência
tempo de amostragem (4.3.5)

t_i - momento de falha do item i

T - período

u^* - tempo médio previsto entre falhas (4.4)

x - variável auxiliar

X_i - variável aleatória

z - zero

Z - covariável

$Z(t)$ - covariável variável no tempo

α - constante

β - coeficiente de regressão
constante (2.5)

Δ - valor mínimo que uma propriedade controlada deve tomar para que se proceda a manutenção preventiva

ϕ - parâmetro (1.3.1)

φ - parâmetro (1.3.1)

λ - taxa de avarias

σ - desvio padrão

ω - velocidade angular

$\hat{}$ - estimador

AMDEC - análise dos modos de avaria e estudo de criticidades
analyse mdes modes de défaillance et étude de criticités
(ver FMECA)

BPP - processo de Poisson ramificado
branched Poisson process

BS - frequência induzida por defeitos nas esferas de um rolamento
ball spin frequency

DT - período de tempo em que o equipamento não está disponível

down - time

FMECA - ver AMDEC
failure mode, effect and criticality analysis

FTF - velocidade de rotação do conjunto da gaiola de um rolamento de esferas
fundamental train frequency

HPP - processo homogêneo de Poisson

IR - frequência de vibração do caminho interior de um rolamento de esferas
inner race

MTBF - tempo médio de bom funcionamento
mean time between failures

MTTF - tempo médio de funcionamento até à falha
mean time to failure

MTTFF - tempo médio de funcionamento até à primeira falha
mean time to first failure

MTTR - tempo médio de reparação
mean time to repair

NHPP - processo não homogêneo de Poisson

OR - frequência de vibração do caminho exterior de um rolamento de esferas
outer race

RP - processo de renovação

renewal process

SRP - processo de renovação sobreimposto
superimposed renewal process

TBF - tempo de bom funcionamento

TPM - Manutenção produtiva total

UT - período de tempo em que o equipamento está disponível
up - time

ANEXO I

Perspectiva histórica da Manutenção

Neste sub-capítulo procede-se a uma descrição da evolução do modo de encarar a função Manutenção apresentando, ao mesmo tempo, as razões que têm levado a essa evolução.

Traça-se também uma breve panorâmica da situação actual e das possibilidades de evolução para os próximos anos.

AI 1 - A evolução da função Manutenção

A evolução da função Manutenção tem vindo a realizar-se de dois modos distintos ao longo dos anos:

- evolução do modelo de Manutenção com o advento dos diferentes tipos de Manutenção e a respectiva interacção ;
- evolução do âmbito da própria função com a tomada de consciência, por parte dos responsáveis pelas organizações, de que a função Manutenção começa logo após a decisão do investimento num dado bem com a decisão inerente à escolha de um entre um conjunto de bens semelhantes.

Iremos abordar estas duas formas diferentes de evolução.

O conceito de Manutenção surge associado à reparação das avarias numa época em que estas só eram entendidas como tal quando implicavam a paragem dos equipamentos com as consequentes perdas de produção daí decorrentes.

Efectivamente, até ao começo do século XX, as baixas velocidades de funcionamento dos elementos dinâmicos da maquinaria utilizada permitia, muitas vezes, que, embora com funcionamento deficiente, continuassem a trabalhar apesar dos elevados desgastes. Por outro lado, não havendo montada uma organização virada para a Manutenção dos equipamentos, eram os próprios operadores quem melhor conhecia o equipamento e quem, em caso de avaria, se encarregava da sua reparação.

Contudo, com o aumento do número de acidentes, foi a própria pressão das seguradoras que veio a contribuir para que as instalações fabris passassem a incorporar oficinas de Manutenção e passasse a existir pessoal especificamente dedicado a estas operações, conforme referido por AEM (1990).

Mas a evolução que a Manutenção registou desde o início do século levou a que, cada vez mais, a função se autonomizasse dentro da empresa. MIIT (1992) refere este facto, adiantando que a evolução da Manutenção fez surgir filosofias que forneceram à Manutenção o sustentáculo teórico para a aplicação de novos métodos de gestão e de organização que, contudo, só foram possíveis devido à aplicação de técnicas resultantes dos avanços tecnológicos registados e que entretanto surgiram.

Nesta perspectiva, AEM (1990) refere o ano de 1925 como aquele a partir do qual se torna patente na indústria americana a necessidade de organizar a Manutenção de forma mais científica começando a pensar-se na conveniência de intervir sobre os equipamentos antes que se produzisse a rotura que levasse à interrupção do processo produtivo. Surge, assim, o processo de planificação da Manutenção e o germe do que veio a ser mais tarde a Manutenção Preventiva. Durante a 2ª Grande Guerra foi graças a operações planeadas de Manutenção que os países envolvidos conseguiram manter a continuidade do funcionamento dos equipamentos de modo a obter elevados níveis de produção.

Aquele regime forçado de funcionamento levou a que se comesçassem a investigar as causas das avarias, a proceder ao levantamento estatístico das ocorrências e a organizar cientificamente o trabalho.

Por outro lado, se durante a guerra o objectivo único era manter o maior número possível de equipamentos a funcionar, após o conflito passou a dedicar-se maior atenção à componente custo da Manutenção:

Todos estes vectores não têm deixado de desenvolver-se até ao presente e têm vindo a ser assimilados por outros países entre os quais Portugal.

Assim, também em Portugal se passa da Manutenção Curativa para a Manutenção Preventiva Sistemática que, entre nós, surge nas empresas mais avançadas neste campo a partir dos anos 60. Com a Manutenção Preventiva Sistemática as intervenções são efectuadas em função da vida esperada dos equipamentos, a partir das respectivas leis de degradação, e determinadas a partir dos dados resultantes de experiências anteriores.

Mas a filosofia de Manutenção Preventiva Sistemática originava intervenções da Manutenção, ou a substituição dos equipamentos, quando a respectiva vida útil ainda estava longe do fim. Como, a partir do início dos anos 70, a economia mundial voltou a entrar em recessão, houve que encontrar uma forma mais económica de proceder à Manutenção dos equipamentos. Surge, assim, a Manutenção Preventiva Condicionada ou por Controlo de Condição que baseia as intervenções da Manutenção no controlo do estado actual de degradação dos equipamentos, de forma a que a intervenção se processe apenas quando a condição do equipamento deixa de estar adequada ao desempenho que dele se pretende.

As técnicas de inspecção em que se baseia o controlo de condição tinham sido tornadas possíveis graças ao grande desenvolvimento das indústrias electrónicas e aeronáuticas durante os anos 60. Em Portugal, as técnicas de controlo de condição começam a ser aplicadas em finais dos anos 70.

As vicissitudes económicas e a evolução tecnológica levaram a Manutenção do esquema curativo não planeado a um esquema preventivo planeado, que atende às características do equipamento e à sua história anterior. O objectivo tem sido sempre a melhoria da eficácia dos serviços com a optimização técnico-económica da Manutenção. A diferença entre as várias filosofias mede-se através dos tempos de imobilização dos equipamentos, de forma directa, e do custo dos bens produzidos, de forma indirecta.

Mas, como já se referiu, a Manutenção evoluiu de dois modos diferentes. A outra forma de evolução da Manutenção está relacionada com o tipo de funções que devem ser alvo da intervenção do departamento/serviço de Manutenção de uma empresa.

Assim, de uma função de intervenção sobre os equipamentos, destinada apenas a manter ou repor o estado de funcionamento em determinadas condições, a Manutenção foi sendo chamada a intervir também nos seguintes aspectos:

- Colaboração na escolha dos equipamentos a adquirir com vista a que o projecto destes ou as suas características contribuam para um melhor desempenho da Manutenção em termos, por exemplo, de materiais, de avançamentos, de condições de montagem e/ou de desmontagem, de inspecções, de rotinas, etc.
- Colaboração com os serviços de aprovisionamentos na definição e gestão dos "stocks" de peças de reserva, consumíveis, componentes gerais, etc.
Por vezes toda a gestão destes bens está a cargo do serviço de Manutenção.
- Responsabilidade por pequenos trabalhos de alteração em instalações, equipamentos ou infraestruturas.
- Colaboração no projecto de novas instalações e acompanhamento da construção das mesmas de forma a que, aquando da conclusão dos trabalhos, os serviços de Manutenção estejam a par dos pormenores técnicos relacionados com os novos equipamentos e possam, assim, desempenhar mais eficazmente a sua função.

Mas o serviço de Manutenção pode actuar ainda, com maior ou menor intervenção, de acordo com o esquema organizativo da empresa em que se integra, em:

- gestão de energia
- segurança industrial no que respeita aos aspectos técnicos relacionados com a condução dos equipamentos e, sobretudo, com as intervenções da Manutenção sobre esses equipamentos
- formação específica

De acordo com A. S. Corder (1976) e A. Kelly (1977), a tecnologia de Manutenção, abrangendo de forma lata os aspectos financeiros, de gestão, de engenharia, etc., designa-se por Terotecnologia. Kelly apresenta um conjunto de factores que, segundo este autor, afectam o ciclo de vida do equipamento, muito próximo dos que apontamos acima.

Corder define a Terotecnologia como uma combinação de todos aqueles aspectos aplicados aos bens e equipamentos com vista à obtenção de custos baixos de manutenção durante o ciclo de vida desses bens e equipamentos. Indica ainda que esse conceito está relacionado com a especificação e o projecto em termos de fiabilidade e manutenibilidade das instalações, máquinas, equipamentos, edifícios e estruturas e com a sua instalação, arranque, manutenção, modificação e substituição e com o retorno da informação em termos de projecto, desempenho e custos.

Corder indica como objectivos da Manutenção:

- o aumento da vida útil dos bens e equipamentos
- assegurar a disponibilidade óptima dos equipamentos instalados e a obtenção do máximo retorno possível do investimento
- assegurar que todo o equipamento de emergência está em condições de operacionalidade imediata sempre que dele se necessita
- assegurar a segurança do pessoal operativo

A Manutenção aparece assim como uma função que, embora não produtiva, é determinante para a produtividade da empresa. Com efeito, a Manutenção relaciona-se com a produtividade através do desempenho dos equipamentos e dos seus custos de operação. As operações de Manutenção aumentam o nível do desempenho dos equipamentos e a sua disponibilidade mas, ao mesmo tempo, fazem aumentar os custos de operação. A. Kelly (1977), tendo em conta estas considerações, define como objectivos da Manutenção a obtenção de um equilíbrio óptimo entre aqueles efeitos, ou seja, o equilíbrio que maximiza a contribuição do serviço de Manutenção para a produtividade da empresa.

É nesta perspectiva que se insere também este trabalho e, por isso, se procede ao estabelecimento de uma relação entre parâmetros de qualidade e parâmetros de funcionamento.

AI 2 - O modelo de Manutenção

O acréscimo de produtividade, segundo MIIT (1992), implica maior qualidade e diversificação da equipa e aparece associado à implementação de filosofias de Manutenção mais sofisticadas. Necessita-se, assim, de maior nível tecnológico e, para além de executantes, também de preparadores e inspectores que é necessário formar (ver AI 4.) e que permitem manter qualquer tipo de Manutenção que se pretenda, nomeadamente por controlo de condição.

Contudo, não se justifica que todos os equipamentos sejam sujeitos a Manutenção Preventiva Sistemática até porque as técnicas de controlo de condição não são extensíveis a todo o tipo de avarias - MIIT (1992). Por estas razões, Craveiro (1991a) explicita que o modelo de Manutenção a adoptar deve incluir os diversos tipos de Manutenção.

A escolha do modelo acaba por influenciar os custos de produção devido a:

- repercussão directa na Produção
- influência indirecta na Qualidade
- peso da Manutenção na estrutura de custos

Os trabalhos acima citados desenvolvem pormenorizadamente este assunto.

Carneiro (1992), subscrevendo o que acima se expôs, procede à descrição de um caso prático de aplicação de um modelo, indicando as fases por que passou o serviço de Manutenção desde a simples Manutenção Curativa até à Preventiva Sistemática e ao Controlo de Condição.

A concretização de um modelo de Manutenção revela-se, de acordo com Craveiro (1991a), através de um sistema integrado de Gestão da

Manutenção assistida por computador e interactuante com o controlo de condição dos equipamentos.

O sistema integrado de gestão da Manutenção deverá prever uma ligação íntima com as diferentes funções da empresa interactuantes com a Manutenção, conforme MIIT (1992) preconiza e Carneiro (1992) exemplifica com um caso concreto. A implementação deste sistema integrado de Manutenção vai implicar a organização da gestão da Manutenção e a utilização da informática como suporte de toda a informação.

Pereira (1991) apresenta uma forma segundo a qual se pode proceder à organização das características dos equipamentos tendo já em vista a informatização da Manutenção e a aplicação de técnicas de Controlo de Condição.

Corral (1991) apresenta também uma aplicação da informática à Manutenção através de um sistema integrado de dados de avião. Trata-se de um sistema integrado de recolha de dados no próprio avião interactuante com as fases de manutenção de modo a permitir diagnósticos fiáveis.

Repare-se que Craveiro (1991a) apresenta o seu caso como um processo semelhante podendo-se fazer o paralelo entre o sistema de recolha de dados no avião de Corral e o sistema de recolha de dados de Controlo de Condição descrito em Craveiro (1991a).

É o enorme volume de informação que se tem que gerir na Manutenção que torna a utilização da informática praticamente imprescindível. Através do recurso a um sistema informatizado, o gestor pode programar a utilização dos meios de que dispõe no médio/longo prazo das diferentes intervenções deixando para os serviços operacionais a programação de curto prazo. Assim, o sistema informático emitirá as intervenções de Manutenção Preventiva Sistemática e assimilará os pedidos de intervenção curativa.

O controlo de condição, por seu lado, deverá ser considerado como um meio de otimizar a matriz das intervenções planeadas complementando com informação mais completa e actualizada a informação de carácter estatístico em que a Manutenção planeada se baseia. O controlo de

condição pode, assim, atrasar ou antecipar as intervenções previstas no planeamento o que vem provocar um aumento da disponibilidade dos equipamentos para a Produção sem baixar o nível da Qualidade dos produtos.

As técnicas normalmente utilizadas têm sido, para além das inspecções visuais:

- Medição e análise de vibrações
- Termografia
- Análises de lubrificantes

Em casos específicos podem analisar-se outros parâmetros de funcionamento (pressões, potências, etc.).

O controlo de condição poderá reduzir os custos de Manutenção e as taxas de avaria (há dados que apontam para valores até 50%, para cada um destes parâmetros, nos EUA), e permite aumentar o tempo de vida útil dos equipamentos e a produtividade (os mesmos dados apontam para valores entre os 25 e os 30%).

A aplicação de Manutenção Planeada apoiada informaticamente permite analisar de forma detalhada o MTBF, proceder ao tratamento estatístico dos valores levantados e, assim, atendendo aos valores encontrados através do modelo fiabilístico utilizado, calcular o ponto óptimo de substituição do equipamento.

O controlo de condição permite ainda avaliar da justeza da política de grandes revisões e paragens dos equipamentos e das melhorias e correcções introduzidas e, também, baixar a taxa de avarias nos períodos imediatamente posteriores a essas revisões.

É importante referir que a adopção de uma política de controlo de condição para um determinado conjunto de equipamentos pode ser baseada numa monitorização permanente desses equipamentos ou num programa de inspecções. Uma das dificuldades da sua implementação poderá estar nesta decisão. Sherwin (1989) apresenta um método

quantitativo de proceder a esta análise, baseado nas teorias de Markov, para taxas de avaria constantes.

AI 3 - O controlo da Manutenção

Como todas as funções da empresa, também a Manutenção terá que ter a sua actividade controlada para que se consiga, em cada instante, avaliar o seu desempenho e decidir sobre as acções a desenvolver para o melhorar se tal se considerar necessário.

Esse controlo deverá ser exercido tendo em atenção os custos envolvidos e a respectiva rendibilidade e a qualidade do trabalho executado. O último aspecto pode ser avaliado através do histórico dos equipamentos e, nesse aspecto, a introdução de controlo de condição e a aplicação de métodos fiabilísticos são processos através dos quais se consegue avaliar a qualidade das intervenções. Outros aspectos, como, por exemplo, o tempo necessário para a execução de determinada tarefa, estão fora do âmbito deste trabalho.

Nesta secção abordar-se-á o problema dos custos em Manutenção, incluindo os custos de investimento, e os meios de estimar e/ou controlar - a estimativa é o primeiro passo para o controlo de custos. A outra perspectiva da abordagem relaciona-se com a rendibilidade desses custos - é necessário investir mas é necessário também que se possa saber calcular os proveitos retirados desses investimentos. Será feita uma referência ao controlo da disponibilidade dos equipamentos.

D. J. White , em Jardine (1973), indica que se estimou em 2000 milhões de libras por ano o gasto da indústria britânica em Manutenção. Começa por fazer notar que, sendo o número tão grande, se colocariam grandes hipóteses de o reduzir, apontando dois motivos para que tal não suceda:

- desconhecimento dos benefícios obtidos ao investir nos serviços de Manutenção
- desconhecimento da quantidade de trabalho necessária em áreas específicas da Manutenção

Segundo o mesmo autor, os benefícios retirados do investimento em Manutenção são, nesta área, o aspecto menos estudado e, ao mesmo tempo, o mais difícil de abordar. A interacção entre a Manutenção e outras funções da empresa, por um lado, e entre decisões tomadas em diferentes momentos, por outro, tornam muito complexos alguns problemas relacionados com a Manutenção. Por isso são necessários meios sofisticados para os resolver e, de entre esses, os autores citados apontam a Investigação Operacional. Esta ferramenta pode dar uma ajuda fundamental na formulação do problema, na construção do modelo e na obtenção da solução mas é necessário ter sempre em conta que há que possuir os dados referentes à acção da Manutenção na empresa e respectivos custos.

Jelen e Black (1983) referem que os registos das empresas são a única fonte fiável em termos de contabilização dos custos de Manutenção embora haja poucos trabalhos publicados sobre este assunto. Defendem, contudo, que, com a experiência, a Manutenção pode ser estimada como uma função do investimento obtendo, assim, valores padrão para optimização de custos.

Adiantam os seguintes valores:

- Percentagem do custo da Manutenção em relação ao investimento anual da empresa

de 2 % para uma unidade fabril relativamente simples sem condições de corrosão

a 11 % para uma unidade complexa com severas condições de corrosão

Exemplos

5 %, em média, para uma refinaria de petróleo

7 % para unidades de obtenção de ácido sulfúrico

3 % para unidades individuais simples

- Percentagem do custo de mão de obra em relação aos custos totais de Manutenção

60 %

- Percentagem do custo de Manutenção de uma unidade laborando a 75 % da sua capacidade em relação aos mesmos custos a 100 % de capacidade

85 %

- Idem a 50 % de capacidade

75 %

Embora os custos de Manutenção tendam a aumentar com a idade dos equipamentos, a estimativa deve ser feita em relação a um valor médio podendo equalizar-se o processo através de um valor médio de depreciação.

Rapp (1976) apresenta vários modelos matemáticos de optimização do investimento em Manutenção tratados a partir de um caso simples isolado. Começando por isolar as funções Manutenção e investimento para estudar as relações entre elas, estende os modelos a situações mais complexas como, por exemplo, a consideração do efeito dos impostos.

Este autor estuda as relações entre o montante dos custos da Manutenção e o tempo de amortização desses investimentos e os efeitos das alterações que, durante esse período, sejam feitas ao modelo inicialmente adoptado na rentabilidade dos investimentos.

Kelly (1971) e Sacristán (1991) abordam o controlo da Manutenção através de processos de simulação de situações que procuram retratar o mais possível as condições reais. Sacristán apresenta o seu ponto de vista como mais um caso particular da aplicação da informática à Manutenção, sendo a simulação feita em relação às condições de trabalho da linha de produção que contém os equipamentos cuja manutenção pretendemos estudar em termos de disponibilidade operacional. Considera, curiosamente, MTBF, MTTR e Disponibilidade Operacional como parâmetros da produção com especial interesse para a Manutenção.

Harjunpaa (1992) apresenta alguns processos para determinar o desempenho da Manutenção, baseando-se em dados recolhidos em indústrias finlandesas e dando especial atenção aos parâmetros económicos da Manutenção e ao modo de os analisar. apresenta a

Manutenção Industrial como uma parte da actividade da empresa e trata os parâmetros caracterizadores das operações da Manutenção como "números chave". Defende que, embora haja um vasto número desses parâmetros, dos quais encontrou na literatura mais de 50, bastam cinco deles para medir a influência da Manutenção na Produção. Baseia a gestão na SBU (Strategic Business Unit, i. e., uma mina, uma fundição, em suma, uma unidade de produção) e considera três tipos diferentes de gestão: a gestão da SBU, a gestão da Produção e a gestão da Manutenção. Para cada uma delas apresenta vários parâmetros ou "números chave" para caracterizar cada um desses tipos de gestão. Os "números chave", ao serem comparados entre diversas empresas e diversos sectores, conduzem ao levantamento de questões importantes podendo levar, a partir daí, à definição dos sectores onde se tornará necessário intervir para melhorar. no fundo, uma outra forma de apresentar os chamados "ratios" de Manutenção.

O'Reilly (1992) e Van der Mooren (1992) debruçam-se também sobre este tipo de problemas embora sob perspectivas diferentes. Assim, O'Reilly apresenta um conjunto de formas de avaliação da Manutenção baseadas em parâmetros do género dos apresentados por Harjunpaa mas definindo-lhes o significado, a periodicidade de medição e a forma de, em cada momento, os comparar. Avalia a organização da Manutenção, a gestão de peças de reserva, os custos, a carga, o planeamento e a Manutenção Preventiva. Van der Mooren apresenta uma visão original ao defender que os custos de Manutenção podem ser estimados logo na fase de projecto do equipamento apresentando alguns pontos através dos quais, na fase de projecto, se pode fazer baixar os posteriores custos de manutenção do equipamento que está a ser projectado.

AI 4 - Situação actual e perspectivas de evolução

A aplicação de instrumentação electrónica de controlo do estado de funcionamento e de sistemas integrados de informação e gestão assistidos por computador, com bases de dados tão diversificadas e abrangentes como pessoal, preparações, afectações, equipamentos, rotinas, cargas, etc. e programas de planeamento, de interacção com o controlo de condição, de simulação, etc., constitui a grande novidade, em termos de Manutenção, nos tempos que correm, por comparação com as décadas anteriores.

Segundo AEM (1990), a Manutenção enfrenta a sua terceira geração.

As bases de dados informáticas permitem hoje que se conheçam em muito maior escala os dados referentes ao comportamento dos equipamentos, numa mesma empresa, e os dados referentes aos custos gerais e/ou específicos da manutenção, num dado país ou conjunto de países. A importância que tem sido dada nos últimos anos à Manutenção tem permitido multiplicar as iniciativas conducentes à troca de informações como seminários e congressos pelo que, também aí, tem havido uma maior fonte de informações.

Consideramos que as novas tecnologias vieram desencadear uma nova revolução industrial que veio exigir novas estruturas e novas filosofias de Manutenção entre as quais se contam a Terotecnologia, já abordada em AI 1 e o TPM - Manutenção Produtiva Total, baseado na determinação da melhor taxa de utilização dos equipamentos a partir da noção de "rendimento sintético", na participação de todos os elementos da empresa, na investigação de alterações que permitam melhorar o desempenho. Kelly (1992) apresenta o que, em seu entender, são as principais características do TPM, através de observações realizadas no Japão e em empresas japonesas instaladas no Reino Unido passando em revista, para além disso, as experiências de outras unidades industriais europeias onde o TPM foi aplicado. É interessante verificar que o autor considera que este método obteve o seu sucesso através de factores decorrentes da gestão de recursos humanos e não de qualquer técnica de engenharia que, numa ou noutra situação específica, seja aplicada em paralelo com o TPM.

Schjolberg (1992), relacionando as novas filosofias de Manutenção com os custos da função, apresenta alguns resultados referentes à indústria norueguesa baseados nas respostas a um inquérito por parte de 194 empresas entre 725 consultadas.

Os custos médios com manutenção são de 2.5 milhões NOK e, desses, cerca de 30 % são dispendidos com controlo de condição.

Os aspectos relacionados com a formação do pessoal são outra vertente da Manutenção actual devida à evolução constante de técnicas e filosofias. Désir (1992) e Pereira (1992) debruçam-se sobre este aspecto ao focar, respectivamente, a importância da formação na produtividade da empresa,

no que respeita aos profissionais de Manutenção, devido à variedade de solicitações a que estão sujeitos, e a importância da passagem de novas tecnologias e filosofias de Manutenção através da descrição de dois casos típicos de formação em Manutenção ocorridos em Portugal.

Numa perspectiva mais geral que a dos autores anteriores, também AEM (1990) se refere ao problema da formação em Manutenção.

Mas a Manutenção deverá continuar a evoluir dentro das linhas base acima referidas durante, pelo menos, a próxima década. Os novos materiais, a automação e o desenvolvimento das tecnologias de informação vão continuar a ser dos maiores polos de desenvolvimento da Manutenção, a par com o desenvolvimento de modelos matemáticos para a simulação das mais diversas condições e sob os mais variados aspectos.

AEM e Schjolberg, nos trabalhos já citados, e Jones (1992) referem, de um modo ou de outro, as perspectivas de evolução da Manutenção para os próximos anos.

Jones (1992) defende a aplicação de técnicas de simulação como as mais apropriadas para que se possa definir o conjunto de operações de Manutenção aplicáveis a reservatórios submarinos e enquadrando a simulação como o resultado de um levantamento de características que deve nortear a actuação dos responsáveis pela definição das políticas de Manutenção para os próximos anos. De notar que já Kelly e Sacristán (op. cit.) tinham referido técnicas de simulação aplicadas a diversos tipos de equipamentos como uma forma de construir planos de Manutenção.

Schjolberg, já citado, aponta o uso cada vez maior da Manutenção Preventiva como o modo de aumentar a disponibilidade dos equipamentos. Mas refere também a necessidade de, nos próximos anos, se aumentar o estatuto da Manutenção na empresa, se melhorar a organização do trabalho em Manutenção, se introduzirem cada vez mais sistemas integrados de Manutenção assistidos por computador, etc.

AEM (1990) prevê a utilização próxima de sistemas inteligentes no diagnóstico de avarias e em algumas situações complexas.

AEM (op. cit.) refere a intensificação da utilização de sistemas informáticos e da contratação, por parte das empresas, de trabalhos de manutenção ao exterior.

Uma palavra final para, mais uma vez, referir a necessidade cada vez maior de investir na formação do pessoal da Manutenção, a começar pelo engenheiro. A variedade dos meios utilizados, dos equipamentos a manter, dos locais de trabalho e das tarefas a realizar impõem que não se descure este aspecto pois, por comparação, o pessoal da Produção trabalha sempre com os mesmos equipamentos, no mesmo local e com os mesmos materiais, pelo menos durante a vida desses equipamentos.

A modelação matemática imporá que cada vez mais seja dada atenção a estes aspectos na formação do engenheiro de Manutenção quer a nível dos *curricula* académicos normais quer a nível de cursos de pós-graduação.

Groenendijk (1995) aponta para a necessidade da existência de engenheiros de uma maior cooperação entre o sector académico e a indústria para melhor se interligarem os estudos e desenvolvimentos teóricos com a realidade prática. É necessário também que os engenheiros industriais sejam mantidos a par dos novos desenvolvimentos através de programas regulares de formação e actualização. A tendência actual, em termos de manutenção, aponta ainda para uma mudança, embora tímida, na forma de encarar a avaria: de uma perspectiva meramente mecânica caminha-se para uma perspectiva geral de inserção em sistemas de gestão e organização.

ANEXO II

O "software" utilizado

AII 1 - Introdução e apresentação

Neste trabalho utiliza-se, para a obtenção de resultados através do modelo de riscos proporcionais, o "software" BMDP. Consideramos fora do âmbito deste trabalho quaisquer considerações comparativas entre diferentes "softwares" eventualmente disponíveis no mercado e passíveis de ser utilizados com o mesmo fim e que podem, aliás, ser encontradas noutras obras. Aitkin (1980) e Kalbfleish e Prentice (1980) tratam especificamente o problema da aplicação de determinados "softwares" a estudos de fiabilidade. Leitão (1989) compara várias destas ferramentas e, entre elas, as que são utilizadas nos trabalhos acima referidos.

O "software" BMDP utilizado faz parte de um pacote estatístico global designado por PC-90 do qual já foram editadas até ao momento várias versões. A versão aqui considerada foi designada por 7.0 e apresenta, até ao momento, dois modos de apresentação um dos quais designado por Dynamic e cuja edição data de Agosto de 1993.

O pacote designado por PC-90 é composto por 44 rotinas sendo a rotina 2L a que procede à análise de sobrevivência através da utilização do modelo dos riscos proporcionais.

Segundo as informações contidas no catálogo "PC-90", os programas correm em IBM PC, AT, PS/2 e compatíveis (DOS 3.0 ou seguintes). Requer 512 ou 640 Kbytes de RAM, consoante as versões, e um disco duro, sendo necessários, aproximadamente, 12 Mbytes de capacidade de armazenagem para guardar todas as rotinas em linha sendo de 2 Mbytes a capacidade recomendada como mínima. O "software" utilizado correu num computador pessoal tipo 486 DX - 33 MHz.

AII 2 - A rotina 2L

A rotina 2L do pacote PC-90 foi especialmente concebida para realizar análises de sobrevivência com base no modelo de riscos proporcionais. É um programa que faz análise regressiva a partir de dados referentes a tempos de sobrevivência ou com esse aspecto relacionados. Esta rotina está preparada para a realização de dois tipos de análise sendo o primeiro baseado no modelo dos riscos proporcionais e o segundo no modelo dos tempos de falha acelerada (trata-se de um modelo especialmente concebido para tratar dados recolhidos em experiências realizadas impondo condições gradualmente mais severas aos sistemas em estudo de modo a acelerar a ocorrência da falha avaliando, ao mesmo tempo, qual a influência desses factores).

A rotina providencia três testes de significância para os parâmetros definidos como covariáveis, os dois já citados em 2.11 e o teste de Wald. Todos estes testes estatísticos são comparados com a distribuição qui-quadrado com um número de graus de liberdade igual ao número de coeficientes levados a zero. É importante referir, contudo, que a eficácia relativa destes três testes não está definida pelo que, quando os problemas em estudo apresentam poucos casos para análise, este problema deve ser tratado com algum cuidado.

Quando não se indica qual dos testes se pretende usar o programa assume, por defeito, o teste de Wald.

A rotina 2L permite trabalhar com covariáveis dependentes do tempo podendo estas ser introduzidas através dos parágrafos específicos do "software" BMDP ou através do recurso a rotinas próprias em Fortran.

BMDP (1992) apresenta todas as informações disponíveis sobre a rotina 2L com exemplos de aplicação relativos a diversas situações em estudo. No apêndice B dessa obra é apresentada a formulação matemática associada aos processos computacionais utilizados.

AII 3 - Processos de estimação

A rotina 2L estima os coeficientes de regressão do modelo dos riscos proporcionais recorrendo ao método iterativo de Newton-Raphson. A

estimativa inicial assumida por defeito para os coeficientes é zero mas pode ser especificado outro valor qualquer. O método pára quando a diferença entre dois valores da verosimilhança parcial logaritmizada, calculados em duas iterações consecutivas, é menor que 0.00001, se nenhum outro valor for especificado, ou quando forem atingidas 15 iterações. O número máximo de bissecções é, também por defeito, 5.

Na presença de tempos "ligados" é utilizada a aproximação expressa através da equação 2.15 e as funções de risco e de sobrevivência são estimadas através das relações expressas pelas equações 2.29 e 2.31, respectivamente. Note-se que estas estimativas só são feitas para os valores das covariáveis consideradas significativas no modelo final. É também calculada a estimativa de Kaplan-Meier para todos os conjuntos de valores que se tenham pretendido para as covariáveis.

AII 4 - Apresentação dos resultados

A rotina 2L, embora apresente os resultados já anteriormente referidos, não apresenta a possibilidade de representação gráfica para todos.

Assim, é possível obter as variáveis estatísticas comuns, média, desvio padrão, etc., o logaritmo da máxima verosimilhança parcial, o valor qui-quadrado global e o seu valor- p e a norma do vector das primeiras derivadas da verosimilhança logarítmica para que se possa aferir do grau de aproximação entre as estimativas obtidas e a estimativa de máxima verosimilhança.

Para cada covariável obtêm-se os respectivos coeficientes de regressão, os erros padrão assintóticos, o quociente entre o coeficiente de regressão e o erro e um coeficiente que reflecte o efeito de cada covariável na função de risco e que é igual à exponencial do coeficiente de regressão.

São ainda calculados, para cada caso, os valores das funções de sobrevivência e de risco base acumulado e os resíduos de Cox e Snell. Faz-se ainda a comparação com a estimativa de Kaplan-Meier.

Quanto à representação gráfica, a rotina fornece apenas a função de sobrevivência e a função log(-log) da função de sobrevivência que testa a condição de proporcionalidade. A função de sobrevivência pode ser

representada para várias combinações de valores das covariáveis podendo, em cada gráfico, aparecer em simultâneo, para comparação, até cinco representações, cada uma referente a uma daquelas combinações.

O método usado para a estimativa da função de sobrevivência (ver 2.7, eq. 2.31), como permite fazer a estimativa da função para qualquer ponto até ao ponto em que se deu a última avaria, faz com que se obtenha a representação gráfica para todos os pontos e não apenas para os pontos de avaria.

Leitão (1989) refere que, em versões anteriores, era possível a obtenção da representação gráfica dos resíduos. Nas actuais versões isso não acontece por razões que o mesmo autor explicita.

AII 5 - Últimos desenvolvimentos

Várias versões têm sido produzidas ao longo dos últimos anos para o "software" estatístico PC-90 da BMDP. Referem-se aqui as alterações mais significativas obtidas com a versão PC-90/Dynamic em relação à versão PC-90 7.0 em modo não Dynamic por serem as duas únicas que foram utilizadas neste trabalho.

A versão 7.0 Dynamic necessita, segundo BMDP (1993) de:

- IBM PC 386, 486 ou compatível
- Mínimo de 4 Mbytes de RAM
- Coprocessador matemático
- Máximo de 30 Mbytes de disco duro

O modo Dynamic trouxe algumas alterações significativas aos modos de operação do pacote PC-90 das quais se destacam:

- a possibilidade de utilização de grandes conjuntos de dados mediante a afectação de 64 Mbytes da memória RAM disponível através da utilização de opção de configuração ;
- utilização inteligente da linguagem de comandos específica BMDP;
- representação gráfica de alta resolução;

- a importação e a exportação directa de dados para outros "softwares" comuns no mercado.

No que respeita à rotina 2L, há a apontar a possibilidade de se proceder à análise de riscos competitivos, opção que não figura na versão 7.0 simples.

AII 6 - Insuficiências

Apesar dos recentes desenvolvimentos realizados, a rotina 2L mantém algumas insuficiências importantes. Referem-se aqui as que se consideraram de maior relevância para este estudo.

Assim, e em primeiro lugar, é de referir a representação gráfica da função de risco que, além de não permitir a comparação visual da estimativa de Kaplan-Meier com a função e risco resultante da consideração de cada um dos diferentes conjuntos de valores das covariáveis que se tenha optado por representar, não apresenta também qualquer comparação com a função de risco base resultante da consideração de uma distribuição tipo Weibull que não é, aliás, calculada. Repare-se que a distribuição de Weibull é considerada nesta rotina para os modelos de tempo de falha acelerada.

Em segundo lugar, não é dada a possibilidade de representar graficamente os resíduos de Cox e Snell nem a sua aferição através da comparação com a respectiva função de risco acumulada. Repare-se, contudo, que esta representação já esteve disponível em versões anteriores. Ainda em relação aos resíduos, uma referência para o facto de também não serem calculados os resíduos de Schoenfeld.

Uma das vantagens do modelo dos riscos proporcionais é a possibilidade de trabalhar com covariáveis variáveis no tempo. A este respeito, torna-se evidente que a rotina se encontra demasiado direccionada para as aplicações médicas ao partir do princípio que a monitorização contínua de covariáveis é rara e, por isso, a principal utilização de covariáveis variáveis no tempo é a verificação da condição de proporcionalidade (ver 2.9). Por outro lado, não se encontram disponíveis representações gráficas para os casos em que se consideram este tipo de covariáveis mediante a explicitação do momento da representação e do conjunto de valores pretendidos, para esse momento, para as covariáveis independentes do tempo.

De referir, contudo, que as últimas alterações introduzidas, ao facilitar a importação e a exportação de dados, vieram facilitar alguns destes aspectos.

ANEXO III

Equipamento para medição de vibrações

Uma dada vibração pode ser geralmente medida em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração correspondendo a cada uma destas formas outros tantos tipos de transdutores.

Assim, o transdutor mais comum para medição de deslocamento é a sonda de proximidade cujo funcionamento se baseia nos campos eléctricos de alta frequência induzidos no intervalo existente entre a sonda e o órgão dinâmico cuja vibração se pretende medir quando este último está em movimento. A sonda de proximidade mede as diferenças sofridas por esse intervalo, ou seja, as distâncias relativas entre a sonda e a superfície do órgão dinâmico. É importante referir que a sonda sinaliza, para além dos deslocamentos relativos, quaisquer irregularidades existentes na superfície dinâmica (de acabamento superficial, de características do material, etc.) sendo o sinal transmitido a resultante das variações induzidas por essas irregularidades e dos deslocamentos relativos.

Qualquer dos métodos utilizados tem as suas vantagens e inconvenientes. A sonda de proximidade é utilizada sempre que o órgão girante não tolere o desequilíbrio provocado por uma massa que com ele contacte e nos casos em que coexistam com o eventual movimento vibratório movimentos relativos muito lentos como, por exemplo, os que sejam induzidos pelas expansões térmicas cujo efeito possa interessar averiguar também. Como limitações é de referir a necessidade de o elemento dinâmico ser electricamente condutor, de modo a que se possa criar o campo eléctrico, a necessidade de a superfície ser uniforme, isto é, não poderem existir furos ou rasgos, etc a menos que sejam provisoriamente eliminados, para além de a superfície dever ser o mais possível rectificadas e/ou polida, a necessidade de calibração da sonda de acordo com o material da superfície e, sempre que a precisão o exija, a necessidade de compensar a deformação induzida pelo próprio movimento.

O transdutor de velocidade é um instrumento sísmico e consiste numa massa interna, que reveste a forma de um íman permanente, suspensa em molas. Rodeando esta massa encontra-se um fluido de amortecimento, normalmente um óleo. Ligado ao invólucro exterior existe um enrolamento de arame.

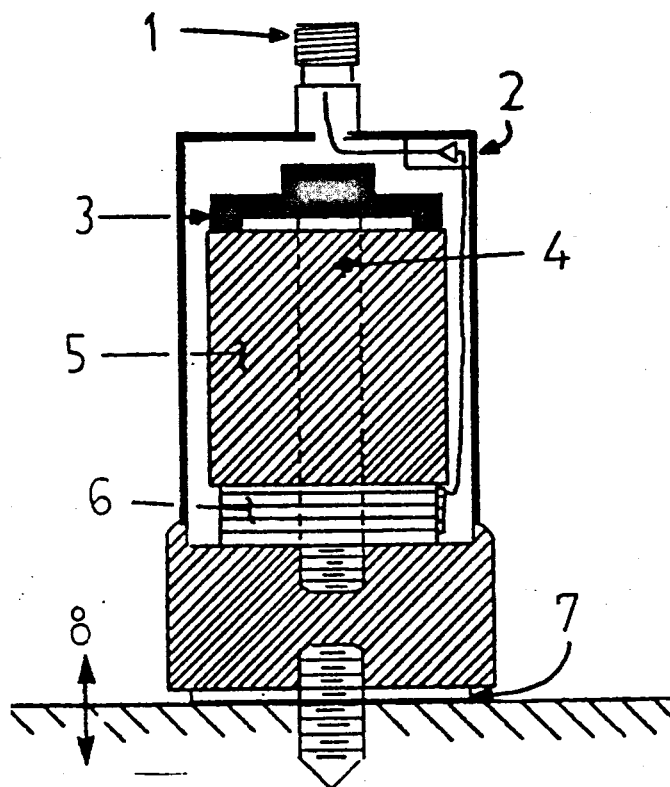
Quando em operação, o transdutor de velocidade trabalha ligado ao objecto cujo nível vibratório se pretende medir transmitindo-se aquele movimento vibratório ao invólucro exterior do transdutor permanecendo a massa interior estacionária porque está suspensa pelas molas. O movimento relativo entre a massa magnética e o enrolamento de arame gera um potencial eléctrico que vai ser proporcional à velocidade do movimento proporcionando, assim, a possibilidade de contabilizar a velocidade.

O transdutor de velocidade pode ser ligado directamente a um osciloscópio ou a outro instrumento de leitura o que constituirá sem dúvida uma vantagem para a sua utilização.

Existem, contudo, alguns óbices significativos à sua utilização. Assim, o transdutor de velocidade é um instrumento de dimensões relativamente grandes o que faz com que, quando acoplado a massas que não sejam suficientemente maiores, possa afectar o sinal vibratório resultante e adulterar as medições. Por outro lado, as massas interiores em suspensão possuem uma taxa de risco bastante superior às dos outros tipos de transdutores aqui referidos. Refira-se ainda o facto de o enrolamento de arame poder ser sensível a campos electromagnéticos exteriores adicionando as ondas electromagnéticas assim recebidas ao sinal vibratório e enviando a soma obtida para o instrumento de análise. É, por isso, necessário um cuidado redobrado quando se trabalha com estes instrumentos junto a motores eléctricos devendo fazer-se um teste antes de efectuar as medições de modo a verificar, antes de acoplar o transdutor, se ele está a receber algum sinal próximo dos 50 Hz (a frequência da nossa corrente).

O transdutor de aceleração mais comum é também do tipo sísmico e é o acelerómetro piezoeléctrico. Este instrumento consiste num cristal de quartzo com uma massa aparafusada no topo e uma mola a comprimir o quartzo.

A figura A3.1 ilustra o funcionamento do acelerómetro piezoeléctrico, instrumento que foi utilizado em todas as situações reportadas neste trabalho.



- 1 - Ligação
- 2 - Circuitos electrónicos internos
- 3 - Mola
- 4 - Cristais de compressão
- 5 - Massa
- 6 - Material piezoeléctrico
- 7 - Isolamento
- 8 - Superfície vibratória

Constituição de um acelerómetro

Figura A3.1

O material piezoeléctrico tem a propriedade de gerar uma carga eléctrica sempre que é deformado. A utilização do acelerómetro faz-se ligando-o ao objecto sujeito a vibração; nessas condições a massa sísmica tende a manter-se estacionária. Assim, como o corpo do acelerómetro vibra solidariamente com o objecto, o cristal é comprimido e aliviado sucessivamente gerando uma carga eléctrica alternadamente positiva ou

negativa consoante o cristal se encontra em fase de compressão ou de descompressão, respectivamente.

A carga é proporcional à força e esta, por sua vez, proporcional à aceleração. O acelerómetro apresenta como vantagens a sua simplicidade construtiva, o tamanho reduzido, a larga resposta em frequência e a sua gama de utilização dinâmica bastante larga porque estes instrumentos podem detectar vibrações muito baixas e não se danificam com as vibrações muito grandes. Pode-se considerar que não existem limitações para a utilização dos acelerómetros na monitorização de máquinas contrariamente ao que acontece com os outros instrumentos referidos que funcionam apenas em gamas de utilização bastante mais restritas, segundo refere Wowk (1991).

Existem, contudo, outras razões que levam a preferir a utilização de acelerómetros em relação à utilização dos transdutores de proximidade e de velocidade. A primeira, por exemplo, é de ordem prática e diz respeito aos próprios instrumentos e aparelhos utilizados; com efeito, os analisadores espectrais actuais podem fornecer uma indicação de aceleração a partir de transdutores de velocidade ou de deslocamento por derivação mas essa possibilidade não se efectua sem erros que serão evitados se forem utilizados acelerómetros.

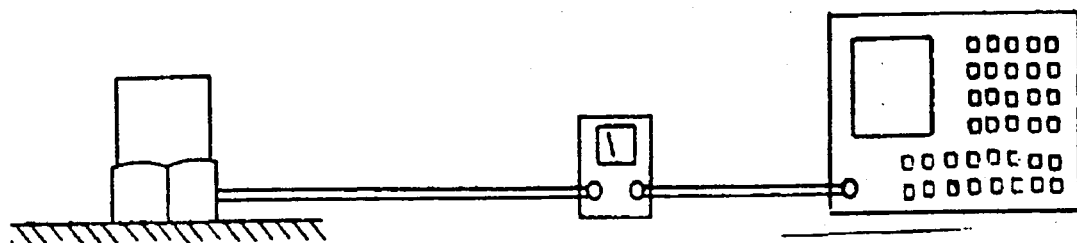
Outra vantagem da utilização dos acelerómetros é a de que a medição de aceleração em g's evita a conversão de unidades entre os sistemas inglês e métrico para além de que a aceleração é proporcional às forças que são as causadoras directas dos danos dos equipamentos e é um bom aferidor do conforto ou do desconforto humano.

Os acelerómetros têm ainda sensibilidade a altas frequências o que permite a sua utilização para a detecção de defeitos em rolamentos ou, de modo mais lato, em apoios sendo a visualização do resultado através da aceleração uma das formas mais eficazes de proceder à aferição daqueles defeitos.

Há dois tipos diferentes de acelerómetros que diferem um do outro, essencialmente, pelo facto de um deles necessitar de um amplificador de sinal externo e de o outro já o trazer incorporado.

A amplificação do sinal é necessária porque o sinal saído do acelerómetro tem uma impedância de tal modo elevada que a sua utilização directa pela grande maioria dos equipamentos de análise é impraticável.

Os acelerómetros que são montados com amplificador de sinal externo são designados por acelerómetros de carga. Os acelerómetros que já possuem, na sua construção, o circuito electrónico de amplificação incorporado são designados por acelerómetros de voltagem.



Montagem esquemática de um sistema de recolha de dados
com circuito integrado piezoeléctrico
Figura A3.2

A utilização deste tipo de acelerómetros é vantajosa sempre que se pretendam realizar medições em diferentes equipamentos porque os acelerómetros de carga impõem algumas limitações respeitantes ao tipo de cabos de ligação utilizados que retiram flexibilidade ao conjunto de instrumentação para medida utilizado pelo inspector.

No caso dos acelerómetros de voltagem é necessário recorrer à utilização de uma bateria de alimentação. De referir que os dois tipos de instalação não são compatíveis e a sua utilização de modo errado conduz a leituras erróneas. Os acelerómetros de voltagem também não suportam temperaturas elevadas sendo por isso necessário recorrer à utilização de acelerómetros de carga sempre que se esteja perante temperaturas superiores a cerca de 120 ° C, conforme refere Wowk (1991).

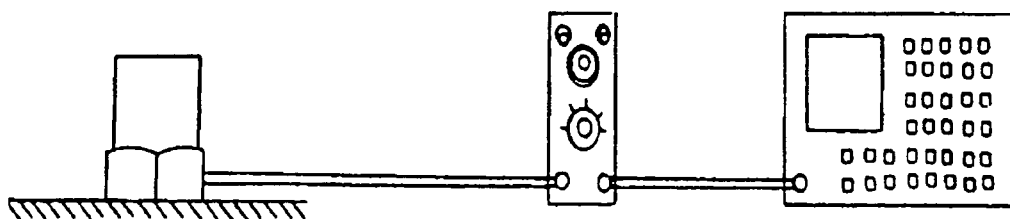
É importante ter em conta que a escolha do acelerómetro obedece a diversos factores. Para além dos que já foram referidos, há a registar, entre os mais importantes, os seguintes:

- sensibilidade
- resposta em frequência
- linearidade

Factores como o tamanho, peso e montagem não serão aqui abordados atendendo a que os acelerómetros utilizados são de tamanho desprezável quando comparados com os equipamentos sobre os quais foram instalados.

Para movimentos de grande amplitude, superior a 10 g, devem-se utilizar acelerómetros de baixa sensibilidade; em contrapartida, para movimentos de amplitude muito baixa devem-se utilizar acelerómetros de alta sensibilidade. Para monitorizar a maioria das máquinas utilizadas na indústria os acelerómetros com sensibilidade na gama dos 100mV/g dão a melhor resposta em termos do compromisso sensibilidade e resposta em frequência.

A linearidade representa a percentagem de desvio em relação a um valor constante da sensibilidade para um determinado valor medido. É um indicador do grau de precisão do acelerómetro ao longo da sua gama de medida.



Montagem de sistema de carga com amplificador
utilizado em Renault

Fig A3.3

ANEXO IV

Listagens do programa de regressão para obtenção da relação entre cargas dos moinhos

Apresentam-se a seguir as listagens a partir das quais se obtiveram as expressões 3.1 e 3.1a. A listagem 4.1 parte de apenas 4 pontos e a listagem 2 parte de 10 pontos.

- listagem 4.1

```
/INPUT    VARIABLES = 2.  
          FORMAT = FREE.
```

```
/VARIABLE  NAMES = pot1,  
            pot.
```

```
/PRINT    DEGREE = 2.
```

```
/REGRESS  DEPENDENT = POT.  
          INDEPENDENT = POT1.  
          DEGREE = 2.
```

```
/END
```

```
CASE  1    2  
NO. pot1  pot
```

```
-----  
 1 390.00 1515.00  
 2 430.00 1800.00  
 3 310.00 1200.00  
 4 225.00  750.00
```

```
NUMBER OF CASES READ..... 4
```

DESCRIPTIVE STATISTICS OF DATA

```
-----  
VARIABLE  TOTAL    STANDARD ST.ERR  COEFF SMALLEST LARGEST  
NO. NAME  FREQ. MEAN  DEV. OF MEAN OF VAR  VALUE  VALUE  RANGE  
  
1 pot1    4 338.75 90.772 45.386 .26796 225.00 430.00 205.00
```

2 pot 4 1316.3 450.06 225.03 .34193 750.00 1800.0 1050.0

INDEPENDENT VARIABLE..... 1 pot1
 DEPENDENT VARIABLE..... 2 pot
 REGRESSION WEIGHT VARIABLE..... 0
 DEGREE OF POLYNOMIAL..... 2
 PRINT CORRELATION MATRIX..... NO
 PRINT ORTHOGONAL POLYNOMIAL..... NO
 PRINT RESIDUALS AT DEGREE(S)..... 2

DATA ARE READ IN SINGLE PRECISION AND COMPUTATIONS ARE PERFORMED IN DOUBLE PRECISION USING ORTHOGONAL POLYNOMIALS.

*** N O T E *** THE REPORT BELOW USES ONLY CASES THAT HAVE ACCEPTABLE VALUES
 FOR BOTH THE DEPENDENT AND INDEPENDENT VARIABLES.

NUMBER OF CASES READ..... 4

VARIABLE		STANDARD			
NO.	NAME	MEAN	DEVIATION	MINIMUM	MAXIMUM
1	pot1	338.7500	90.7721	225.0000	430.0000
2	pot	1316.2500	450.0625	750.0000	1800.0000

RESULTS FOR POLYNOMIAL OF DEGREE 1

POLYNOMIAL COEFFICIENTS ORTHOGONAL POLYNOMIAL POLYNOMIAL IN X

DEG	REGRESSION COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T VALUE	REGRESSION COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T VALUE
0	2632.500000	48.644	54.1	-3.567724E+2	1.076E+2	-3.3
1	776.489728	48.644	16.0	4.938812E+0	0.309E+0	16.0

RESIDUAL MEAN SQUARE = 2366.22630 (D.F. = 2)
 MULTIPLE R-SQUARE = 0.99221

RESULTS FOR POLYNOMIAL OF DEGREE 2

POLYNOMIAL COEFFICIENTS ORTHOGONAL POLYNOMIAL POLYNOMIAL IN X

DEG	REGRESSION COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T VALUE	REGRESSION COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T VALUE
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

0	2632.500000	67.912	38.8	-2.312920E+2	7.911E+2	-0.3
1	776.489728	67.912	11.4	4.121922E+0	5.075E+0	0.8
2	10.971296	67.912	0.2	0.125064E-2	0.774E-2	0.2

RESIDUAL MEAN SQUARE = 4612.08325 (D.F. = 1)
 MULTIPLE R-SQUARE = 0.99241

CASE NO.	CASE LABEL	REGR WEIGHT	X VALUE	Y VALUE	PREDICTED VALUE	2ND DEG ORTH. POLY. RESIDUAL VALUE
1		1.00000	390.000	1515.000	1566.479	-51.479
2		1.00000	430.000	1800.000	1772.377	27.623
3		1.00000	310.000	1200.000	1166.690	33.310
4		1.00000	225.000	750.000	759.454	-9.454

GOODNESS OF FIT TEST

FOR THE POLYNOMIAL OF EACH DEGREE, A TEST IS MADE FOR ADDITIONAL INFORMATION IN THE ORTHOGONAL POLYNOMIALS OF HIGHER DEGREE. THE NUMERATOR SUM OF SQUARES FOR EACH OF THESE TESTS IS THE SUM OF SQUARES ATTRIBUTED TO ALL ORTHOGONAL POLYNOMIALS OF HIGHER DEGREE AND THE DENOMINATOR SUM OF SQUARES IS THE RESIDUAL SUM OF SQUARES FROM THE FIT TO THE POLYNOMIAL OF DEGREE 2. A SIGNIFICANT F-STATISTIC THUS INDICATES THAT A HIGHER DEGREE POLYNOMIAL SHOULD BE CONSIDERED.

DEG	SUM OF SQUARES	D.F.	MEAN SQUARE	F	TAIL PROB.
0	603056.667	2	301528.333	65.38	0.09
1	120.369	1	120.369	0.03	0.90
RESID	4612.083	1	4612.083		

- listagem 4.2

am Output File: C:\DYNAMIC\BMDPOUT&.OUT

BMDP5R

/INPUT VARIABLES = 2.
 FORMAT = FREE.

/VARIABLE NAMES = pot1,
 pot.

/PRINT DEGREE =2.

/REGRESS DEPENDENT = POT.
 INDEPENDENT = POT1.

DEGREE = 2.

/END

CASE 1 2
NO. pot1 pot

1	390.00	1515.00
2	430.00	1800.00
3	310.00	1200.00
4	225.00	750.00
5	305.00	1150.00
6	350.00	1350.00
7	360.00	1400.00
8	403.00	1640.00
9	300.00	1140.00
10	400.00	1600.00

NUMBER OF CASES READ. 10

DESCRIPTIVE STATISTICS OF DATA

VARIABLE NO.	TOTAL FREQ.	STANDARD MEAN	ST.ERR. DEV.	ST.ERR. OF MEAN	COEFF OF VAR	SMALLEST VALUE	LARGEST VALUE	RANGE
1 pot1	10	347.30	62.438	19.745	.17978	225.00	430.00	205.00
2 pot	10	1354.5	306.45	96.909	.22625	750.00	1800.0	1050.0

INDEPENDENT VARIABLE. 1 pot1
DEPENDENT VARIABLE. 2 pot
REGRESSION WEIGHT VARIABLE. 0
DEGREE OF POLYNOMIAL. 2
PRINT CORRELATION MATRIX. NO
PRINT ORTHOGONAL POLYNOMIAL NO
PRINT RESIDUALS AT DEGREE(S). 2

DATA ARE READ IN SINGLE PRECISION AND COMPUTATIONS ARE PERFORMED IN DOUBLE PRECISION USING ORTHOGONAL POLYNOMIALS.

*** N O T E *** THE REPORT BELOW USES ONLY CASES THAT HAVE ACCEPTABLE VALUES

FOR BOTH THE DEPENDENT AND INDEPENDENT VARIABLES.

NUMBER OF CASES READ. 10

VARIABLE NO.	MEAN	STANDARD DEVIATION	MINIMUM	MAXIMUM
1 pot1	347.3000	62.4376	225.0000	430.0000

2 pot 1354.5000 306.4533 750.0000 1800.0000

RESULTS FOR POLYNOMIAL OF DEGREE 1

POLYNOMIAL COEFFICIENTS ORTHOGONAL POLYNOMIAL POLYNOMIAL IN X

DEG	REGRESSION COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T VALUE	REGRESSION COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T VALUE
0	4283.305091	27.477	155.9	-3.439996E+2	5.168E+1	-6.7
1	916.069075	27.477	33.3	4.890583E+0	0.147E+0	33.3

RESIDUAL MEAN SQUARE = 754.99373 (D.F. = 8)
MULTIPLE R-SQUARE = 0.99285

RESULTS FOR POLYNOMIAL OF DEGREE 2

POLYNOMIAL COEFFICIENTS ORTHOGONAL POLYNOMIAL POLYNOMIAL IN X

DEG	REGRESSION COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T VALUE	REGRESSION COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T VALUE
0	4283.305091	28.811	148.7	-2.097857E+2	2.609E+2	-0.8
1	916.069075	28.811	31.8	4.052625E+0	1.601E+0	2.5
2	15.152553	28.811	0.5	0.126331E-2	0.240E-2	0.5

RESIDUAL MEAN SQUARE = 830.05000 (D.F. = 7)
MULTIPLE R-SQUARE = 0.99313

CASE NO.	CASE LABEL	REGR. WEIGHT	X VALUE	PREDICTED Y VALUE	2ND DEG ORTH. POLY. RESIDUAL VALUE
1		1.00000	390.000	1515.000	1562.887 -47.887 -0.029
2		1.00000	430.000	1800.000	1766.428 33.572 0.493
3		1.00000	310.000	1200.000	1167.932 32.068 -0.274
4		1.00000	225.000	750.000	766.010 -16.010 0.635
5		1.00000	305.000	1150.000	1143.784 6.216 -0.254
6		1.00000	350.000	1350.000	1363.388 -13.388 -0.285
7		1.00000	360.000	1400.000	1412.884 -12.884 -0.246
8		1.00000	403.000	1640.000	1628.594 11.406 0.111
9		1.00000	300.000	1140.000	1119.699 20.301 -0.229
10		1.00000	400.000	1600.000	1613.393 -13.393 0.077

GOODNESS OF FIT TEST

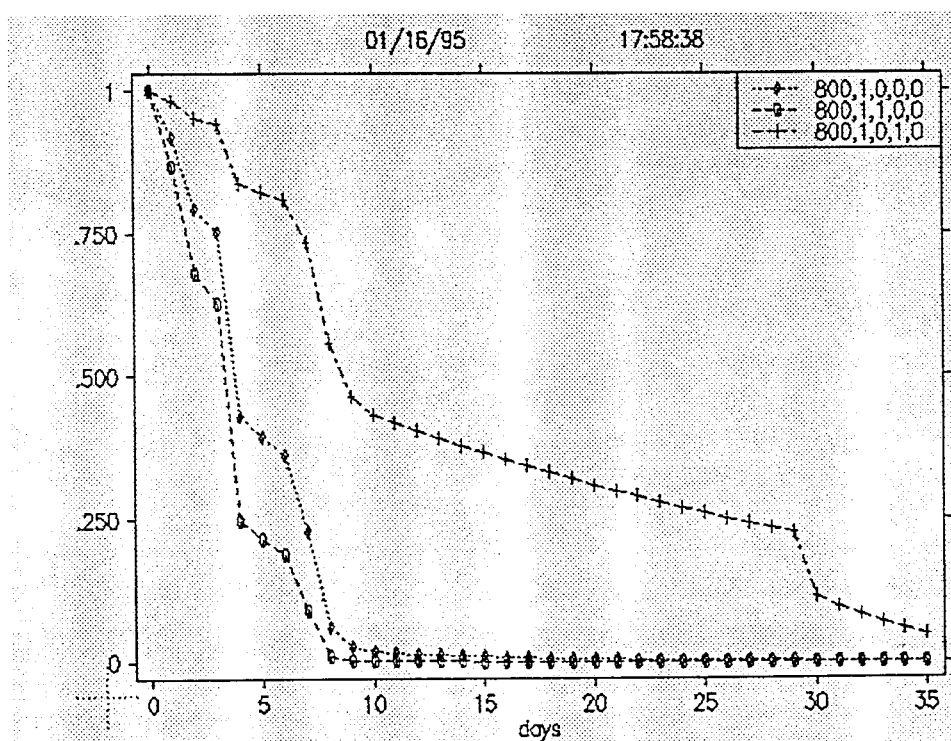
FOR THE POLYNOMIAL OF EACH DEGREE, A TEST IS MADE FOR ADDITIONAL INFORMATION IN THE ORTHOGONAL POLYNOMIALS OF HIGHER DEGREE. THE NUMERATOR SUM OF SQUARES FOR EACH OF THESE TESTS IS THE SUM OF SQUARES ATTRIBUTED TO ALL ORTHOGONAL POLYNOMIALS OF HIGHER DEGREE AND THE DENOMINATOR SUM OF SQUARES IS THE RESIDUAL SUM OF SQUARES FROM THE FIT TO THE POLYNOMIAL OF DEGREE 2. A SIGNIFICANT F-STATISTIC THUS INDICATES THAT A HIGHER DEGREE POLYNOMIAL SHOULD BE CONSIDERED.

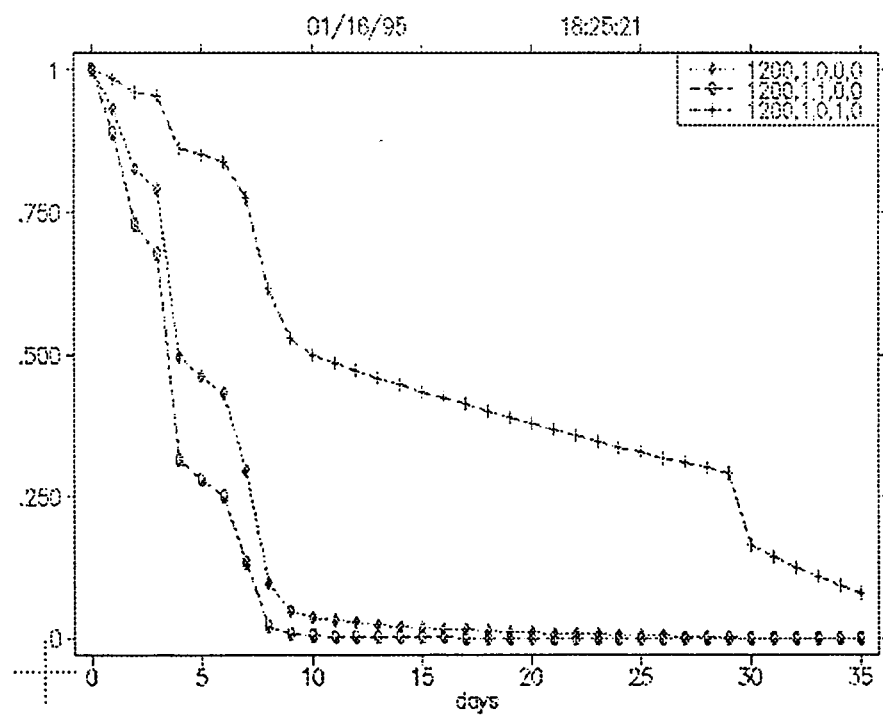
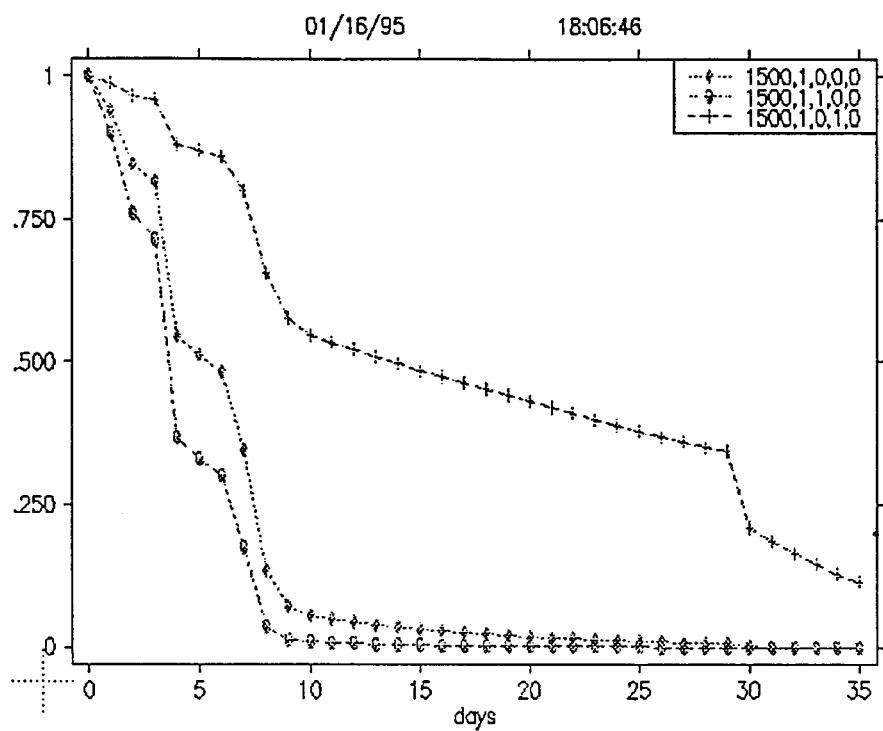
DEG	SUM OF SQUARES	D.F.	MEAN SQUARE	F	TAIL PROB.
0	839412.150	2	419706.075	505.64	0.00
1	229.600	1	229.600	0.28	0.62
RESID	5810.350	7	830.000		

ANEXO V

Efeito dos pontos de medida no funcionamento do moinho

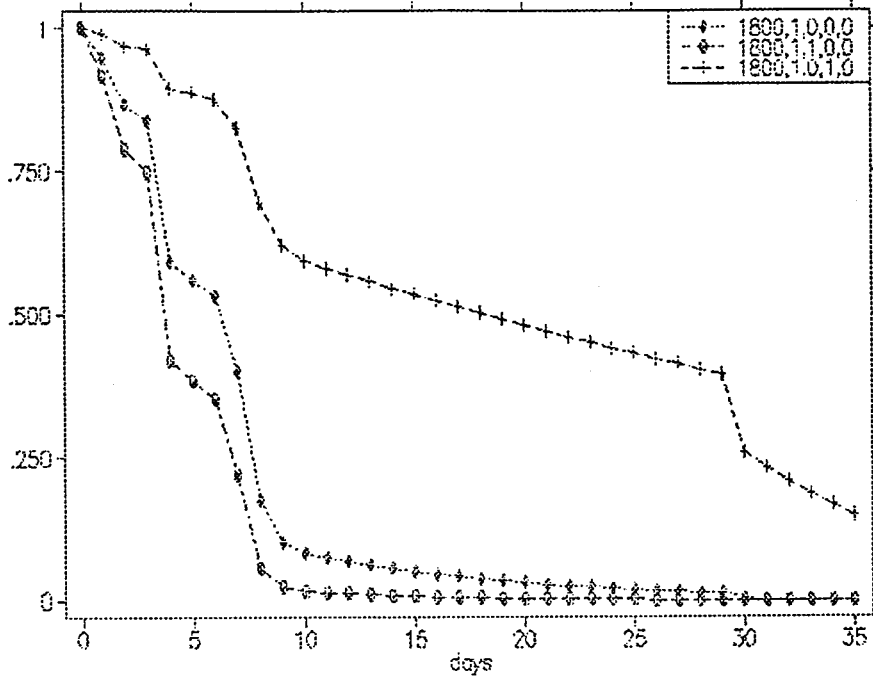
Apresentam-se de seguida os efeitos dos pontos de medida no funcionamento do moinho, conforme fig. 3.6 mas de forma a permitir leitura mais detalhada.





01/16/95

18:31:52



ANEXO VI

Programa para teste de independência entre variáveis

Neste sector testa-se a hipótese de duas características de uma determinada população serem independentes.

Se T for maior ou igual que o qui-quadrado para o nível de significância alfa, rejeita-se a hipótese de independência; caso contrário, será aceite essa hipótese.

```
10 PRINT "programa para teste de independencia em tabela de duas
entradas"
20 PRINT "introduza as linhas"
30 INPUT n
40 PRINT "introduza nº de colunas"
50 INPUT m
60 DIM x(n, m)
70 DIM r(n)
80 DIM c(m)
90 FOR i = 1 TO n
100 PRINT "introduza linha"; i; " um valor de cada vez"
110 FOR j = 1 TO m
120 INPUT x(i, j)
130 r(i) = r(i) + x(i, j)
140 c(j) = c(j) + x(i, j)
150 NEXT
160 s = s + r(i)
170 NEXT
180 FOR i = 1 TO n
190 FOR j = 1 TO m
200 u = u + (x(i, j) - r(i) * c(j) / s) ^ 2 / (r(i) * c(j))
210 NEXT
220 NEXT
```

O sector que se segue pretende fornecer uma aproximação ao cálculo da função distribuição do quiquadrado.

```
230 PRINT "a partir de agora vamos calcular a prob de uma var qui2
ser<t"
270 g = (n - 1) * (m - 1)
280 sv = (g - 1) / 2
290 p = t / 2
300 d = t / 2 - g / 2 + 1 / 3
310 d = d - .04 / g
320 IF g = 1 GOTO 380
330 IF sv = p GOTO 400
340 h = sv / p
350 t = (1 - h * h + 2 * h * LOG(h)) / (1 - h) ^ 2
360 t = d * SQR((1 - t) / p)
370 GOTO 410
380 t = d * SQR(2 / p)
390 GOTO 410
400 t = d / SQR(p)
410 ua = ABS(t)
420 IF ua > 4 GOTO 550
430 v = ua ^ 2
440 i = ua
450 FOR j = 1 TO 40
460 ua = -ua * v * (2 * j - 1) / (2 * j * (2 * j + 1))
470 i = i + ua
480 NEXT
490 i = i / SQR(2 * 3.14159)
500 IF t < 0 GOTO 530
510 PRINT "a probabilidade ,"; .5 + i
520 GOTO 590
530 PRINT "a probabilidade ,"; .5 - i
540 GOTO 590
550 IF t < 0 GOTO 580
560 PRINT " a probabilidade , maior que"; 1 - 10 ^ -4
570 GOTO 590
580 PRINT " a probabilidade , menor que"; 10 ^ -4
590 END
```

ANEXO VII

Fórmulas de cálculo das frequências características dos rolamentos

- FTF

$$FTF = \frac{\omega}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right) \quad (\text{AVII 1})$$

- BS

$$BS = \frac{P_d}{2B_d} \omega \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cos^2 \phi \right) \quad (\text{AVII 2})$$

- OR

$$OR = N.(FTF) \quad (\text{AVII 3})$$

- IR

$$IR = N.(\omega - FTF) \quad (\text{AVII 4})$$

Em que

- ω - velocidade de rotação do caminho interior em rotações por segundo
- B_d - diâmetro das esferas
- P_d - diâmetro *pitch* (diâmetro da circunferência formada pelos centros das esferas)
- N - nº de esferas
- ϕ - ângulo de contacto entre as esferas e os caminhos de rolamento

ANEXO VIII

Notas sobre a análise de Fourier

Uma função caracterizadora de um fenómeno periódico com período T pode ser representada por um conjunto de sinusoidais que constituem a série de Fourier.

Seja, então, $x(t)$, essa função; o seu desenvolvimento em série de Fourier é dado por:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (\text{AVIII 1})$$

em que

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{AVIII 2})$$

representa a frequência fundamental.

Os coeficientes que figuram em AVIII 1, coeficientes de Fourier, são dados por:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

(AVIII 3), (AVIII 4)

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

Através destes coeficientes pode-se conhecer o conteúdo em frequência do sinal e, também, as amplitudes para as diferentes frequências múltiplas da frequência fundamental e as respectivas fases. O problema surge, quando se pretende calcular aqueles coeficientes através das expressões AVIII 3 e AVIII 4, respectivamente, porque normalmente não se conhece a expressão analítica de $x(t)$.

Para contornar este problema recolhem-se dados a uma dada frequência e fica-se com um sinal discreto (com N pontos por período). A expressão que representa esse sinal é conhecida por Série de Fourier discreta e é dada por:

$$x(t_k) = a_0 + \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right] \quad (\text{AVIII 5})$$

Desta forma os coeficientes de Fourier podem ser obtidos por:

$$a_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)$$

(AVIII 6), (AVIII 7)

$$b_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)$$

AVIII 6 e AVIII 7 fornecem um processo de cálculo dos coeficientes de Fourier que, por ser lento, é substituído pela análise FFT, um método também discreto que evita a repetição de cálculos semelhantes.

Para uma descrição mais pormenorizada, ver Nunes (1990).

ANEXO IX

Programa para obtenção das funções de risco e de sobrevivência resultantes da utilização do modelo dos riscos proporcionais com covariáveis dependentes do tempo

Programa surv

Neste anexo apresenta-se a listagem comentada do programa Basic que, recebendo como entrada os valores dos coeficientes de regressão calculados pela rotina BMDP 2L e os valores do tempo de sobrevivência e das covariáveis para cada caso e com ordenação dos casos por ordem crescente dos tempos de sobrevivência, calcula os valores da função de sobrevivência e da função de risco para cada padrão definido.

Apresentam-se duas versões, a primeira para uma aproximação linear $\text{rug}(t)$, e a segunda para uma aproximação exponencial $\text{rug}(t)$.

AIX 1 - Aproximação linear

Neste primeiro sector introduzem-se os coeficientes de regressão calculados por 2L para a situação que pretendemos e o nº de casos da amostra (86 na situação que foi tratada).

```
130 PRINT "INDIQUE BETAS"  
140 FOR a = 1 TO 3  
150 INPUT b(a)  
155 LPRINT b(a)  
160 NEXT  
170 PRINT "DIGA Nº DE CASOS"  
175 INPUT N
```

Dimensionamento da variável tempo de sobrevivência e das covariáveis para 86 casos.

```
176 DIM t(N)
177 DIM dum(N)
178 DIM cov(N)
```

Definição do ficheiro onde se vão ler os dados de entrada para a variável tempo de modo a que a sua leitura possa ser automática e não haja que fazer a sua introdução manual durante a corrida do programa. Este processo será repetido adiante para as restantes variáveis acima dimensionadas.

```
181 INPUT "introduza o nome para o ficheiro de dados de tempos"; surv$
182 OPEN surv$ + ".dat" FOR INPUT AS #1
190 FOR i = 1 TO N
195 DATA surv$
202 INPUT #1, t(i)
205 RESTORE
210 NEXT
211 CLOSE #1
```

Dimensionamento das variáveis calculadas por este programa

```
212 DIM f(N)
213 DIM s(N)
214 DIM h(N)
215 DIM r1(86)
216 DIM rz(86)
217 DIM a1(86)
218 DIM g(86)
219 DIM r2(86)
220 DIM r3(86)
221 DIM r4(86)
222 DIM a2(86)
223 DIM a3(86)
224 DIM a4(86)
```

Definição do ficheiro para leitura dos dados referentes à covariável de vibração.

```
225 INPUT "INTRODUZA NOME PARA FICHEIRO DE DADOS DE  
VIBRAÇÃO"; cov$  
226 OPEN cov$ + ".DAT" FOR INPUT AS #1  
230 FOR i = 1 TO N  
231 DATA cov$  
236 REM cov(i) = cov(i)  
237 INPUT #1, cov(i)  
238 RESTORE  
250 NEXT  
251 CLOSE #1
```

Sector que pede a entrada dos valores que se pretendem para padrão para construir as curvas da função de risco.

```
252 INPUT " 1º valor de cov para pattern"; cov1  
253 INPUT "2º valor de cov para pattern"; cov2
```

Definição do ficheiro para leitura dos valores referentes à covariável muda que caracteriza a máquina

```
255 INPUT "INTRODUZA NOME PARA FICHEIRO DE DADOS"; D$  
256 OPEN D$ + ".DAT" FOR INPUT AS #1  
260 FOR i = 1 TO N  
261 DATA d$  
267 INPUT #1, dum(i)  
269 RESTORE  
280 NEXT  
281 CLOSE #1
```

Introdução dos coeficientes, calculados de acordo com 4.3.6, que relacionam a rugosidade com a vibração de forma linear. Esta entrada manual permite mais adiante a generalização das expressões da função de sobrevivência e outras evitando novas versões do programa.

```
282 PRINT "INTRODUZA COEF PARA ANTECEDER VIB"
```

283 INPUT cf

Definição do ficheiro onde os resultados deste programa serão arquivados.

285 INPUT "INTRODUZA NOME PARA FICHEIRO DE
RESULTADOS"; rz\$

286 OPEN rz\$ + ".dat" FOR OUTPUT AS #2

Controlo das leituras efectuadas.

287 FOR i = 1 TO N

288 PRINT t(i), cov(i), dum(i)

289 NEXT

Cálculo da função de risco de acordo com a expressão 2.25.

290 FOR i = 1 TO N

295 h(0) = 0

300 FOR L = (i + 1) TO N

302 s(1) = 0

305 f(L) = cf * cov(L) * (-.05 * t(L) + 1.66)

310 s(L) = EXP(cov(L) * b(1) + dum(L) * b(2) + b(3) * f(L))

330 s(L) = s(L) + s(L - 1)

340 NEXT

Continuação de acordo com 2.25.

350 h(i) = i / s(N)

360 h(i) = h(i) + h(i - 1) risco base

370 rz(i) = EXP(-h(i)) sobrevivência base

371 sln(i) = ln(-ln(rz(i))) função equivalente à que 2L calcula

375 g(i) = (-.05 * (30 - t(i)) + 1.66)

380 a1(i) = EXP(cov1 * b(1) + b(3) * cf * cov1 * g(i))

381 a2(i) = EXP(cov1 * b(1) + b(2) + b(3) * cf * cov1 * g(i))

382 a3(i) = EXP(cov2 * b(1) + b(3) * cf * cov2 * g(i))

383 a4(i) = EXP(cov2 * b(1) + b(2) + b(3) * cf * cov2 * g(i))

Definição das curvas para cada padrão

```

390 r1(i) = rz(i) ^ a1(i)
391 r2(i) = rz(i) ^ a2(i)
392 r3(i) = rz(i) ^ a3(i)
393 r4(i) = rz(i) ^ a4(i)

```

Impressão de resultados e fecho

```

400 REM LPRINT t(i), rz(i), r(i)
401 PRINT rz(i)
403 PRINT #2, USING "##.#####"; t(i); sln(i); r1(i); r2(i); r3(i); r4(i)
410 NEXT
411 CLOSE #2
412 LPRINT "(0", cov1, ")", "(1", cov1, ")", "(0", cov2, ")", "(1", cov2,
")"
413 LPRINT cf, cov$, rz$

```

AIX 2 - Aproximação exponencial

Neste caso apresentam-se apenas as secções em que as versões diferem.

```

290 FOR i = 1 TO N
295 h(0) = 0
300 FOR L = (i + 1) TO N
302 s(1) = 0
305 f(L) = cf * cov(L) * (1.85 * EXP(-.05 * t(L)))
310 s(L) = EXP(cov(L) * b(1) + dum(L) * b(2) + b(3) * f(L))
330 s(L) = s(L) + s(L - 1)
340 NEXT
350 h(i) = i / s(N)
360 h(i) = h(i) + h(i - 1)
370 rz(i) = EXP(-h(i))
375 g(i) = (1.85 * EXP(-.05 * (30 - t(i))))
380 a1(i) = EXP(cov1 * b(1) + b(3) * cf * cov1 * g(i))
381 a2(i) = EXP(cov1 * b(1) + b(2) + b(3) * cf * cov1 * g(i))
382 a3(i) = EXP(cov2 * b(1) + b(3) * cf * cov2 * g(i))
383 a4(i) = EXP(cov2 * b(1) + b(2) + b(3) * cf * cov2 * g(i))

```

```

390 r1(i) = rz(i) ^ a1(i)
391 r2(i) = rz(i) ^ a2(i)
392 r3(i) = rz(i) ^ a3(i)
393 r4(i) = rz(i) ^ a4(i)

```

Apresenta-se de seguida um exemplo de uma lista de resultados obtidos com a corrida do programa sem inclusão da função de risco.

```

1.0000000 0.9998258 0.9994016 0.9998529 0.9994945
1.0034000 0.9994776 0.9982058 0.9995587 0.9984841
1.0039001 0.9989555 0.9964146 0.9991176 0.9969705
1.0052000 0.9982596 0.9940310 0.9985297 0.9949557
1.0070000 0.9973905 0.9910596 0.9977953 0.9924430
1.0101000 0.9963482 0.9875045 0.9969147 0.9894356
2.0000000 0.9949741 0.9828317 0.9958214 0.9857111
2.0020001 0.9935424 0.9779795 0.9946306 0.9816656
2.0030000 0.9919344 0.9725497 0.9932926 0.9771345
2.0039999 0.9901505 0.9665517 0.9918081 0.9721243
2.0062001 0.9881914 0.9599946 0.9901774 0.9666419
2.0067000 0.9860592 0.9528940 0.9884018 0.9606971
2.0067000 0.9837547 0.9452615 0.9864818 0.9542984
2.0076001 0.9812784 0.9371086 0.9844182 0.9474545
2.0079999 0.9786324 0.9284520 0.9822120 0.9401764
2.0100000 0.9758165 0.9193023 0.9798636 0.9324730
2.0186999 0.9728274 0.9096599 0.9773721 0.9243491
2.0193999 0.9696789 0.8995808 0.9747436 0.9158329
2.0208001 0.9663656 0.8890603 0.9719764 0.9069276
3.0000000 0.9617074 0.8744168 0.9685813 0.8960859
3.0037000 0.9579546 0.8627452 0.9654921 0.8863013
3.0058999 0.9540405 0.8506895 0.9622672 0.8761674
3.0060999 0.9499683 0.8382744 0.9589082 0.8657004
3.0090001 0.9457328 0.8254982 0.9554137 0.8549052
3.0155001 0.9413337 0.8123751 0.9517841 0.8437944
3.0167000 0.9367895 0.7989755 0.9480279 0.8324039
3.0186000 0.9320918 0.7852888 0.9441420 0.8207356
3.0276999 0.9272282 0.7712945 0.9401221 0.8087871
3.0300000 0.9222320 0.7571040 0.9359826 0.7966128
3.0488999 0.9170481 0.7425771 0.9317014 0.7841590
3.0630000 0.9117303 0.7278815 0.9273015 0.7715043
4.0000000 0.9035403 0.7056535 0.9216529 0.7554713
4.0057998 0.8978119 0.6903954 0.9169576 0.7423254
4.0060000 0.8919649 0.6750643 0.9121521 0.7290395
4.0078001 0.8859801 0.6596233 0.9072292 0.7156049
4.0120001 0.8798568 0.6440859 0.9021896 0.7020344
4.0197001 0.8735926 0.6284615 0.8970329 0.6883389
4.0205002 0.8672312 0.6128714 0.8917782 0.6745788
4.0268002 0.8607269 0.5972170 0.8864074 0.6607175
4.0489998 0.8540345 0.5814077 0.8809027 0.6467214
4.0619998 0.8472636 0.5657175 0.8753103 0.6327187
4.0669999 0.8404173 0.5501600 0.8696325 0.6187237

```

4.0720000 0.8334634 0.5346711 0.8638568 0.6047140
 4.0799999 0.8263902 0.5192364 0.8579794 0.5906901
 5.0000000 0.8142841 0.4935564 0.8499606 0.5719306
 5.0233002 0.8067508 0.4780387 0.8437870 0.5577788
 5.0283999 0.7992237 0.4628826 0.8375662 0.5437716
 5.0303998 0.7916259 0.4479328 0.8312674 0.5298449
 5.0330000 0.7839397 0.4331608 0.8248844 0.5159917
 5.0588002 0.7760233 0.4183109 0.8183588 0.5020969
 5.0630002 0.7681642 0.4039291 0.8118118 0.4884248
 5.0704002 0.7602094 0.3897329 0.8051804 0.4748480
 5.1174998 0.7519053 0.3752945 0.7983593 0.4611642
 6.0000000 0.7374398 0.3510554 0.7889189 0.4426902
 6.0282001 0.7289553 0.3373670 0.7819328 0.4293615
 6.0460000 0.7204857 0.3240842 0.7749122 0.4162560
 7.0000000 0.7044770 0.2999975 0.7647045 0.3977107
 7.0135999 0.6957588 0.2874286 0.7574934 0.3849682
 7.0267000 0.6869995 0.2751812 0.7502272 0.3724237
 7.0675001 0.6779605 0.2629353 0.7428069 0.3599151
 7.0716000 0.6691977 0.2514376 0.7354664 0.3478372
 8.0227003 0.6518418 0.2297238 0.7244818 0.3303042
 9.0000000 0.6337457 0.2085361 0.7131557 0.3128919
 9.0286999 0.6243594 0.1981108 0.7054276 0.3013912
 9.0622997 0.6149079 0.1879920 0.6976389 0.2901070
 9.0696001 0.6057032 0.1784952 0.6899222 0.2792257
 9.0735998 0.5965301 0.1693744 0.6821885 0.2686142
 10.0000000 0.5778648 0.1518434 0.6704016 0.2529957
 11.0000000 0.5580450 0.1346794 0.6580814 0.2373703
 11.0667000 0.5479703 0.1265048 0.6498428 0.2273115
 11.1000004 0.5382699 0.1189725 0.6417340 0.2177102
 12.0439997 0.5185012 0.1046150 0.6292843 0.2035335
 13.0000000 0.4983266 0.0912756 0.6165972 0.1897731
 13.0328999 0.4885310 0.0852553 0.6083199 0.1811595
 14.0400000 0.4675022 0.0732901 0.5951359 0.1680176
 15.0000000 0.4468521 0.0627497 0.5820287 0.1556371
 15.0590000 0.4367813 0.0580211 0.5734899 0.1479287
 15.1070004 0.4269139 0.0536387 0.5650139 0.1405486
 16.0000000 0.4070283 0.0455280 0.5520275 0.1297532
 18.0000000 0.3738376 0.0339868 0.5328823 0.1149293
 18.0779991 0.3638155 0.0309562 0.5241305 0.1085707
 19.0000000 0.3437659 0.0254761 0.5106747 0.0992867
 19.0317001 0.3345487 0.0232041 0.5021933 0.0937329
 21.0000000 0.3024242 0.0164013 0.4826604 0.0817853
 22.0000000 0.2822087 0.0129303 0.4685639 0.0738638
 27.0000000 0.2176342 0.0052938 0.4308337 0.0553504

Os dados de controlo do ficheiro são impressos durante a corrida do programa.



ANEXO X

Exemplos de listagens

Apresentam-se de seguida duas listagens de saída BMDP, uma referente ao moinho e outra às rectificadoras de balanceros da Renault, exemplificando esta última uma situação em que os valores do nível vibratório foram utilizados recorrendo, para cada caso, ao valor mais aproximado do valor médio para aquele tempo de sobrevivência em detrimento do valor em tempo de ciclo homólogo, como em 4. Esta saída, embora conduzindo a resultados mais afastados dos valores reais, apresenta coeficientes de regressão com desvio menores.

--- Following output appended to C:\DYNAMIC\BMDPOUT&.OUT ---

```
/INPUT          VARIABLES = 7.  
                FORMAT = FREE.  
                FILE = 'Moinh1.DAT'.  
  
/VARIABLE       NAMES = survival,  
                reject, pot, vib, DP1, DP2,  
                AL.  
  
/FORM          TIME = survival.  
                UNIT = days.  
                STATUS = reject.  
                RESPONSE = 1.  
  
/TRANSFORM     A=1.  
                PERCENT1 = .505 + SQRT(.0814 - .000044*POT).  
                PERCENT2 = .505 - SQRT(.0814 - .000044*POT).  
                PERCENT = A*PERCENT1 + (1 - A)*PERCENT2.  
  
/PRINT         CASES = 21.  
                SURVIVAL.  
  
/REGRESS       COVARIATES = pot, vib, DP1, DP2, AL,PERCENT.  
  
/PLOT          TYPE = SURV, LOG.  
                PATTERN = 800, 1, 0, 1, 0, .72.
```

pattern= 1200, 1,0,1,0,.674.
 PATTERN = 1200, 1, 0, 1, 0,.72.
 PATTERN = 800, 1, 0, 1, 0,.674.
 SIZE = 40, 25.
 file='moinh1p.plt'.

LOG LIKELIHOOD = -37.1798
 GLOBAL CHI-SQUARE = 7.93 D.F.= 6 P-VALUE =0.2436
 NORM OF THE SCORE VECTOR= 0.186E-05

VARIABLE	COEFFICIENT	STANDARD		EXP(COEFF.)
		ERROR	COEFF./S.E.	
3 pot	0.0005	0.0047	0.1043	1.0005
4 vib	0.8364	0.7548	1.1081	2.3080
5 DP1	0.4410	0.7979	0.5527	1.5543
6 DP2	-1.5524	1.4971	-1.0370	0.2117
7 AL	-0.7269	0.8465	-0.8587	0.4834
11 PERCENT	5.3212	24.5507	0.2167	204.6239

--- Following output appended to C:\DYNAMIC\BMDPOUT&.OUT ---

```

/ INPUT      VARIABLES = 6.
             FORMAT = FREE.
             FILE = 'RE64V9.DAT'.

/ VARIABLE   NAMES = surv,
             reject,
             dum,
             VIB25,VIB50,VIB150.

/ FORM       TIME = surv.
             UNIT = days.
             STATUS = reject.
             RESPONSE = 1.

/ REGRESSION COVARIATES = dum, VIB50.
             ADD=RUG.
             INITIAL =-1,1.8,.1.
             HALVING =8.
             CONV=.00001,.8.

/FUNCTION    RUG=26*vib50*(-.05*TIME+1.66).

/ PRINT      CASES = 0.
             COVARIANCE.
             ITER.

/ END
  
```

COX PROPORTIONAL HAZARDS MODEL

RISK TYPE IS LOGLIN

ITERATION LOG
NUMBER HALVINGS LIKELIHOOD PARAMETER ESTIMATES

			dum RUG	VIB50
0	0	-162.11520660	-1.000000 0.100000	1.800000
1	0	-143.98584271	2.032991 0.184085	4.892161
2	0	-140.45047309	1.289731 0.269435	2.434314
3	0	-140.43813214	1.344001 0.278946	2.265597
4	0	-140.43813130	1.344126 0.279130	2.261100

LOG LIKELIHOOD = -140.4381
GLOBAL CHI-SQUARE = 74.67 D.F.= 3 P-VALUE =0.0000
NORM OF THE SCORE VECTOR= 0.548E-05

VARIABLE	COEFFICIENT	STANDARD ERROR	COEFF./S.E.	EXP(COEFF.)
3 dum	1.3441	0.3642	3.6903	3.8348
5 VIB50	2.2611	7.9345	0.2850	9.5936
7 RUG	0.2791	0.2282	1.2233	1.3220

ESTIMATED ASYMPTOTIC COVARIANCE MATRIX

	dum 3	VIB50 5	RUG 7
dum 3	0.13		
VIB50 5	0.49	62.96	
RUG 7	-0.00	-1.76	0.05

NUMBER OF INTEGER WORDS USED IN PRECEDING PROBLEM 1392

ANEXO XI

Exemplos de cálculo

Neste anexo pretende-se ilustrar as formas segundo as quais se aplicam algumas das expressões apresentadas no capítulo 2 e utilizadas no modelo dos riscos proporcionais e nas rotinas informáticas. Para esse fim servimo-nos de exemplos fictícios.

Para o efeito comparam-se os valores fornecidos pela rotina BMDP 2L com os valores calculados manualmente para a verosimilhança parcial e para o desvio padrão do cálculo dos coeficientes de regressão. Parte-se de um modelo a duas variáveis, uma das quais dependente do tempo, e, através de eliminação sucessiva de covariáveis, calculam-se os coeficientes de regressão e as verosimilhanças parciais, sucessivamente, para um modelo a duas, uma ou zero variáveis (neste caso só a verosimilhança para $\beta=0$).

Apresentam-se duas listagens, uma com o processo de regressão e outra com os resultados para o modelo apenas com a covariável fixa no tempo. Em ambas se assinalam os valores cujo cálculo se ilustra a seguir como exemplo.

1ª listagem

BMDP Program Output File: C:\DYNAMIC\BMDPOUT&.OUT

BMDP2L--SURVIVAL ANALYSIS WITH COVARIATES

Release: 7.0 (BMDP/DYNAMIC) Date:

--- Following output appended to C:\DYNAMIC\BMDPOUT&.OUT ---

/ INPUT VARIABLES = 3.
 FORMAT = FREE.

/ VARIABLE NAMES = surv, var2, V1.

/ FORM TIME = surv.

```

UNIT = days.
STATUS = var2.
RESPONSE = 1.

/print      covariance.
           cases=12.

/REGRESSION COVARIATES = V1.
           ADD=v2.
           STEPWISE=MPLR.
           START=IN,IN.

/FUNCTION   v2=v1*(ln(time)-4.79).

```

```

/END

```

CASE	1	2	3
NO. surv	var2	V1	
1	320	0	1
2	270	1	0
3	200	0	1
4	190	0	0
5	160	0	1
6	100	1	1
7	60	1	0
8	50	1	0
9	40	0	0
10	30	0	0
11	15	1	1
12	5	1	1

```

NUMBER OF CASES READ..... 12

```

COX PROPORTIONAL HAZARDS MODEL

```

-----
RISK TYPE IS LOGLIN

```

```

STEP NUMBER 0
-----

```

```

LOG LIKELIHOOD = -9.7871(e)
GLOBAL CHI-SQUARE = 2.68 D.F.= 2 P-VALUE = 0.2622

```

VARIABLE	STANDARD COEFFICIENT	ERROR	COEFF./S.E.	EXP(COEFF.)
3 V1	-1.7034	1.4936	-1.1405	0.1821
4 v2	-1.5956	1.2517 (f)	-1.2748	0.2028

ESTIMATED ASYMPTOTIC COVARIANCE MATRIX

	V1		v2	
	3		4	
V1	3	2.23		
v2	4	1.35	1.57	

STATISTICS TO ENTER OR REMOVE VARIABLES

VARIABLE NO. N A M E	APPROX. CHI-SQ. ENTER	APPROX. CHI-SQ. REMOVE	P-VALUE	LOG LIKELIHOOD
3 V1		1.70	0.1929	-10.6346
4 v2		3.19	0.0742	-11.3804(d)

ENTER TERM TO MOVE:

!V to View Output; ENTER to accept: V1 --->

STEP NUMBER 1 V1 IS REMOVED

LOG LIKELIHOOD = -10.6346
IMPROVEMENT CHI-SQ (2*(LN(MPLR)) = 1.70 D.F.= 1 P = 0.1929
GLOBAL CHI-SQUARE = 1.36 D.F.= 1 P = 0.2440

VARIABLE	STANDARD COEFFICIENT	ERROR	COEFF./S.E.	EXP(COEFF.)
4 v2	-0.7336	0.7142	-1.0272	0.4802

ESTIMATED ASYMPTOTIC COVARIANCE MATRIX

	v2	
	4	
v2	4	0.510

STATISTICS TO ENTER OR REMOVE VARIABLES

VARIABLE NO. N A M E	APPROX. CHI-SQ. ENTER	APPROX. CHI-SQ. REMOVE	P-VALUE	LOG LIKELIHOOD
3 V1	1.70		0.1929	-9.7871(e)
4 v2		1.52	0.2181	-11.3931(a)

ENTER TERM TO MOVE:

!V to View Output; ENTER to accept: v2 --->

STEP NUMBER 2 v2 IS REMOVED

THERE ARE NO TERMS IN THE MODEL AT THIS STEP.

STATISTICS TO ENTER OR REMOVE VARIABLES

VARIABLE NO. N A M E	APPROX. CHI-SQ. ENTER	APPROX. CHI-SQ. REMOVE	P-VALUE	LOG LIKELIHOOD
3 V1	0.03 (b)		0.8737	-11.3804(d)
4 v2	1.52		0.2181	-10.6346

ENTER TERM TO MOVE:

!V to View Output; ENTER to accept: NONE -->

NO TERM PASSES THE REMOVE AND ENTER LIMITS (0.1500 0.1000).

SUMMARY OF STEPWISE RESULTS

STEP NO	VARIABLE (E)NTERED (R)EMOVED	LOG DF	IMPROVEMENT LIKELIHOOD	CHI-SQUARE	P-VALUE	GLOBAL CHI-SQUARE	P-VALUE
0		2	-9.787 (e)			2.677	0.262
1	R 3 V1	1	-10.635	1.695	0.193	1.358	0.244
2	R 4 v2	0	-11.393 (a)	1.517	0.218		

NUMBER OF INTEGER WORDS USED IN PRECEDING PROBLEM 788

BMDP2L--SURVIVAL ANALYSIS WITH COVARIATES

Release: 7.0 (BMDP/DYNAMIC)

END OF INSTRUCTIONS

PROGRAM TERMINATED

BMDP Program Output File: C:\DYNAMIC\BMDPOUT&.OUT

2^a listagem

BMDP2L--SURVIVAL ANALYSIS WITH COVARIATES

Release: 7.0 (BMDP/DYNAMIC) Date:

--- Following output appended to C:\DYNAMIC\BMDPOUT&.OUT ---

/ INPUT VARIABLES = 3.
 FORMAT = FREE.

/ VARIABLE NAMES = surv, var2, V1.

/ FORM TIME = surv.
UNIT = days.
STATUS = var2.
RESPONSE = 1.

/print covariance.
cases=12.

/ REGRESSION COVARIATES = V1.

/ END

	CASE	1	2	3
NO. surv	var2	V1		
1	320	0	1	
2	270	1	0	
3	200	0	1	
4	190	0	0	
5	160	0	1	
6	100	1	1	
7	60	1	0	
8	50	1	0	
9	40	0	0	
10	30	0	0	
11	15	1	1	
12	5	1	1	

NUMBER OF CASES READ..... 12

COX PROPORTIONAL HAZARDS MODEL

RISK TYPE IS LOGLIN

LOG LIKELIHOOD = -11.3804 (d)
GLOBAL CHI-SQUARE = 0.03 (b) D.F.= 1 P-VALUE =0.8735
NORM OF THE SCORE VECTOR= 0.233E-09

VARIABLE	COEFFICIENT	STANDARD ERROR	COEFF./S.E.	EXP(COEFF.)
3 V1	-0.1312	0.8247(c)	-0.1590	0.8771

ESTIMATED ASYMPTOTIC COVARIANCE MATRIX

V1
3

V1 3 0.680

NUMBER OF INTEGER WORDS USED IN PRECEDING PROBLEM 696

BMDP2L--SURVIVAL ANALYSIS WITH COVARIATES

Release: 7.0 (BMDP/DYNAMIC)

a) Recorrendo a 2.15

$$\log L(\beta=0) = -(\ln 2 + \ln 6 + \ln 7 + \ln 8 + \ln 11 + \ln 12) = -11.393$$

b) Recorrendo a 2.16

$$U(\beta=0) = \left[\left(1 - \frac{6}{12}\right) + \left(1 - \frac{5}{11}\right) + \left(0 - \frac{4}{8}\right) + \left(0 - \frac{4}{7}\right) + \left(1 - \frac{4}{6}\right) + \left(0 - \frac{1}{2}\right) \right] = -.193$$

$$I(\beta=0) = \left[\frac{6}{12} - \left(\frac{6}{12}\right)^2 \right] + \left[\frac{5}{11} - \left(\frac{5}{11}\right)^2 \right] + \dots + \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2}\right)^2 \right] = 1.465$$

$$\chi^2 = 1.465^{-1} \times .193^2 = .025$$

c) Recorrendo a 2.16

$$I(\beta = -.1312) = \left[\frac{6e^{-.1312}}{6e^{-.1312} + 6} - \left(\frac{6e^{-.1312}}{6e^{-.1312} + 6} \right)^2 \right] + \dots + \left[\frac{e^{-.1312}}{e^{-.1312} + 1} - \left(\frac{e^{-.1312}}{e^{-.1312} + 1} \right)^2 \right] = 1.47$$

$$\sigma = \sqrt{1.47^{-1}} = .8247$$

d) Recorrendo novamente a 2.15

$$\ln L(\beta = -.1312) = \underset{\substack{\text{casos} \\ 6, 11 \text{ e } 12}}{3} \times (-.1312) - \left[\ln(6e^{-.1312} + 6) + \ln(5e^{-.1312} + 6) + \dots + \ln(e^{-.1312} + 1) \right] = -11.38$$

e) Vai-se, mais uma vez, recorrer-se a 2.15 mas, agora, na sua forma vectorial em Z e β . Há ainda que ter em atenção que, quando se usam covariáveis dependentes do tempo, o valor a introduzir nas expressões para essa variável é, para todos os casos que ainda não falharam, o valor que a covariável tinha no momento em que se dá a falha a que corresponde cada parcela.

$$\begin{aligned} \log L(\beta_1 = -1.7034; \beta_2 = -1.5956) &= \\ &= 3 \times (-1.7034) - 5.45 \times (-1.5956) - \left[\ln(6e^{-1.7034 - 3.18 \times (-1.5956)} + 6) + \ln(5e^{-1.7034 - 2.08 \times (-1.5956)} + 6) + \ln(4e^{-1.7034 - .88 \times (-1.5956)} + 4) + \dots + \ln(e^{-1.7034 + .8 \times (-1.5956)} + 1) \right] = \\ &= -9.79 \end{aligned}$$

f) Recorrendo a 2.18

$$\begin{aligned} I(\beta = -1.5956) &= \left[\frac{6 \times (-3.18)^2 e^{-3.18 \times (-1.5956)}}{6e^{-3.18 \times (-1.5956)} + 6} - \left(\frac{6 \times (-3.18) e^{-3.18 \times (-1.5956)}}{6e^{-3.18 \times (-1.5956)} + 6} \right)^2 \right] + \dots + \left[\frac{.8^2 e^{.8 \times (-1.5956)}}{e^{.8 \times (-1.5956)} + 1} - \left(\frac{.8 e^{.8 \times (-1.5956)}}{e^{.8 \times (-1.5956)} + 1} \right)^2 \right] = \\ &= .638 \\ \sigma &= \sqrt{.638^{-1}} = 1.252 \end{aligned}$$

Mostra-se de seguida uma listagem do programa apresentado de forma já comentada no anexo IX, agora adaptado ao exemplo acima utilizado, e dos respectivos resultados para as funções de risco e de sobrevivência (fiabilidade).

```
130 PRINT "INDIQUE BETAS"
140 FOR a = 1 TO 2
150 INPUT b(a)
155 LPRINT b(a)
160 NEXT

176 DIM t(12)
178 DIM cov2(12)

181 INPUT "introduza o nome para o ficheiro de dados de tempos"; temp1$
182 OPEN temp1$ + ".dat" FOR INPUT AS #1
190 FOR i = 1 TO 12
195 DATA temp1$
202 INPUT #1, t(i)
205 RESTORE
210 NEXT
211 CLOSE #1

212 DIM f(12)
213 DIM s(12)
214 DIM h(12)
215 DIM r1(12)
```



```

216 DIM rz1(12)
217 DIM a1(12)
218 DIM g(12)
220 DIM sln(12)
225 INPUT "INTRODUZA NOME PARA FICHEIRO DE DADOS DE cov"; cov2$
226 OPEN cov2$ + ".DAT" FOR INPUT AS #1
230 FOR i = 1 TO 12
231 DATA cov2$
237 INPUT #1, cov2(i)
238 RESTORE
250 NEXT
251 CLOSE #1
285 INPUT "INTRODUZA NOME PARA FICHEIRO DE RESULTADOS"; rz1$
286 OPEN rz1$ + ".dat" FOR OUTPUT AS #2
287 FOR i = 1 TO 12
288 PRINT t(i), cov2(i)
289 NEXT
290 FOR i = 1 TO 12
295 h(0) = 0
300 FOR L = (i + 1) TO 12
302 s(1) = 0
305 f(L) = cov2(L) * (LOG(t(L)) - 4.79)
310 s(L) = EXP(cov2(L) * b(1) + b(2) * f(L))
330 s(L) = s(L) + s(L - 1)
340 NEXT
350 h(i) = i / s(12)
360 h(i) = h(i) + h(i - 1)
370 rz1(i) = EXP(-h(i))
371 sln(i) = LOG(-LOG(rz1(i)))
375 g(i) = LOG(t(i)) - 4.79
380 a1(i) = EXP(b(1) + b(2) * g(i))
390 r1(i) = rz1(i) ^ a1(i)
403 PRINT #2, USING "###.#####"; t(i); sln(i); r1(i); h(i)
404 LPRINT s(i), sln(i), h(i), r1(i)
410 NEXT
411 CLOSE #2
413 REM LPRINT cov2$, rz1$

```

```

320.000000-3.718078 0.999073 0.024281
270.000000-2.619467 0.996356 0.072842
200.000000-1.926320 0.988269 0.145683
190.000000-1.415494 0.978877 0.242806
160.000000-1.010029 0.958717 0.364208
100.000000-0.673557 0.882319 0.509892
60.000000-0.385875 0.685221 0.679856
50.000000-0.134560 0.521711 0.874100
40.000000 0.088583 0.312775 1.092625
30.000000 0.289254 0.105303 1.335431
15.000000 0.471576 0.000278 1.602517
5.000000 0.638630 0.000000 1.893884

```

FACULDADE DE ENGENHARIA

Rua dos Bragas 4099 PORTO CODEX PORTUGAL
Telef.: 351 2 323201 • Fax: 351 2 319280 • Telex: 27323 FEUP P



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000013994