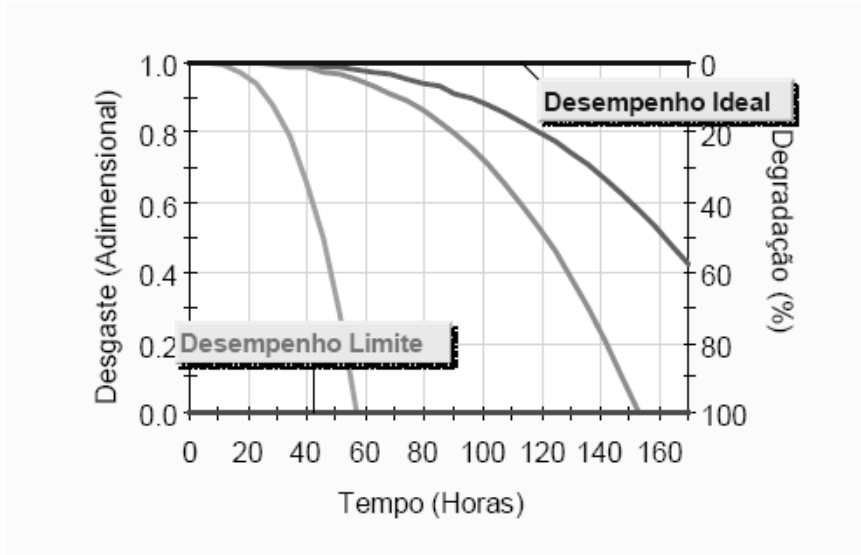




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA  
Área Departamental de Engenharia Mecânica



## Acompanhamento e Análise da Degradação em Componentes Mecânicos

ARNALDO MATEUS SIMÕES DUARTE  
(Bacharel em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Mestre José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Doutora Isabel da Silva Lopes

Mestre José Augusto da Silva Sobral

Setembro de 2010



## Resumo

---

A inovação e o desenvolvimento tecnológico obrigam os fabricantes a uma intensa competição global, face a uma redução no ciclo de desenvolvimento dos produtos e a rigorosos constrangimentos de custos, ao mesmo tempo que enfrentam consumidores mais exigentes, que procuram produtos de Qualidade. A Fiabilidade do bem é um aspecto marcante dessa Qualidade. Tradicionalmente o acesso a essa fiabilidade é baseado em testes de vida, normalmente acelerados. Todavia, para produtos altamente fiáveis, pouca informação a respeito da sua fiabilidade é fornecida por via dos testes de vida, nos quais poucas ou nenhuma falhas são observadas.

Perante este cenário, a análise de degradação surge como uma técnica alternativa atractiva aos clássicos métodos de estudo da fiabilidade, apresentando como grande vantagem o facto de não ser necessário que nenhuma falha ocorra para se obter informação sobre a fiabilidade do bem, beneficiando ainda de uma redução no tempo de duração dos testes.

Este trabalho começa por abordar os fundamentos da teoria da fiabilidade, e sua aplicação ao ciclo de vida dos componentes, fazendo alusão aos modelos de fiabilidade, ou distribuições de vida que mais usualmente se ajustam as várias fases de vida de um bem, nomeadamente a distribuição Exponencial, Normal e com particular destaque à versátil distribuição de Weibull.

De seguida é feita a abordagem à análise de degradação dos componentes como uma técnica útil para estimar a fiabilidade de um bem, e neste contexto é feita a abordagem de uma metodologia de análise da degradação com base na monitorização da condição dos componentes. Quando um bem está sujeito a um processo de degradação, onde se pode fixar um valor limite para a característica que está a ser medida, pode-se recolher uma série de dados relativos ao processo em causa, servindo estes para ajustar um modelo matemático de degradação, que por extrapolação da curva de degradação permitem estimar o tempo até à falha, e por consequência o tempo de vida útil restante.



O trabalho enquadra ainda a análise da degradação dos componentes numa perspectiva de apoio à estratégia de manutenção, no domínio da manutenção condicionada, e em particular no quadro da manutenção preditiva, tendo por objectivo fazer a optimização do programa de manutenção a aplicar, de forma a minimizar os custos globais da função manutenção. Nesta vertente são também considerados os intervalos P-F para monitorizar a evolução do estado de falha, em que é necessário definir o valor do parâmetro analisado para o qual se considere o início do processo de falha e o correspondente valor de falha efectiva.

É apresentado um estudo prático com a colaboração duma prestigiada empresa de comercialização e distribuição de veículos pesados, focalizado num modelo de camião específico comercializado por essa marca. O estudo está direccionado para o sistema de travagem do veículo, mais concretamente a um dos seus componentes mecânicos, as pastilhas de travão. Este componente tem associado o mecanismo de degradação conhecido por desgaste.

A medição do parâmetro de desgaste será feita por meio da técnica de simulação de valores, tendo no entanto em consideração, uma base de dados restrita de valores reais. O estudo de fiabilidade deste componente tem por objectivo fundamental estimar o tempo de Vida Útil Restante (*“Residual Useful Life, RUL”*) para as pastilhas, ou seja, até que se atinja o valor limite admissível (considerado como falha). Para os cálculos foi utilizado o programa informático denominado Weibull ++7. O caso de estudo permitiu determinar para situações particulares a relação entre o desgaste e a distância percorrida, estimando-se desta forma a vida restante (em distância), até ao momento em que o componente atinge o limite de desgaste considerado admissível.

O grande potencial de estudo futuro passa pela elaboração de um modelo (com base em dados reais de exploração), que contemple os principais factores de influência, e que duma forma expedita permita a gestores de frota, fabricantes ou responsáveis da marca fazer a análise da fiabilidade do componente, tendo em conta uma situação específica de exploração. O conhecimento da fiabilidade das pastilhas pode levar à optimização da exploração do veículo, por meio de um planeamento estratégico da sua manutenção,



nomeadamente ao nível do aprovisionamento, na programação das intervenções, e em particular quanto à vida útil restante para as pastilhas.

*Palavras-chave:*

*Análise de degradação, tempo até à falha, fiabilidade, estratégia de manutenção.*



## Abstract

---

The innovation and the technological development force manufacturers to an intense and global competition as the result of reduction in products development cycle and a rigorous control of costs at the same time they face each time more demanding consumers, who look for quality products. Items reliability is an outstanding aspect of this quality. Traditionally, reliability values are achieved based on life tests, normally accelerated life tests. However, for highly reliable products there is a small amount of information available, because few or no failures are observed.

In face of this, degradation analysis appears as an alternative technique to the classic methods of reliability, with the advantage of not being necessary the occurrence of failures in order to obtain information about items reliability, and still having the benefit of not being necessary extensive test periods.

The present work begins with the explanation of reliability theory and its application to the components life cycle, doing reference to reliability models and the most important life distributions applied to items, namely the Exponential distribution, Normal distribution and the versatile Weibull distribution in particular.

Follows an explanation of degradation analysis process as a useful technique to understand the reliability of an item and, in this context, is done an approach of a methodology of analysis for degradation based on condition monitoring. When an item is under a degradation process where it is possible to fix a limit value for the characteristic being measured it is possible to gather data related to this parameter which can be fitted to some known mathematical models. Extrapolated values can then be achieved allowing to draw the degradation curve and estimate time to failure or useful remaining life.

The degradation analysis process is also assumed as a tool to support the strategy of maintenance in the field of on-condition or predictive maintenance within the maintenance optimization thematic area just to minimize global costs. In this scope

---



there are also considered P-F intervals just to observe the evolution of each item condition, in which it is necessary to define what it is considered the beginning or threshold of a failure process (P) and the consequent time for effective failure (F).

A practical study is presented, having the gentle collaboration of a well known commercial enterprise related to heavy vehicles distribution and focused in a specific truck model. The study is directed towards the break system and more specifically to one of its mechanical components, the brake pad. This component has associated wear as the degradation mechanism.

The measurement of the wear parameter is done by using simulation, but having at the same time some real data into consideration. The reliability study of this component has the basic goal of determining the Residual Useful Life (RUL) for the brake pads, or in other words to know when they reach the lower limit for thickness, considering this as a failure. It was used the Weibull ++7 software for the reliability calculations. It allows the determination of specific situations corresponding to the relationship between wear and road distance.

The great potential for future work is focused in the preparation of a model (based on real data), considering the main influence factors which allow fleet managers, manufacturers or persons in charge to make reliability studies taking into account a specific situation. The knowledge of reliability for the brake pads can lead to an optimization on the usage of the vehicle through a strategic planning of its maintenance, basically at the supply level and maintenance activity planning regarding the remaining useful life of brake pads.

*Keywords:*

*Degradation analysis, time to failure, reliability, maintenance strategy*



## *Agradecimentos*

Começo por manifestar o meu profundo agradecimento ao meu orientador Prof. Mestre José Augusto da Silva Sobral, pela incansável ajuda e incentivo dados à realização deste trabalho, manifestando sempre uma total disponibilidade, para responder às várias dúvidas surgidas no decurso do trabalho.

Um agradecimento também especial ao Engenheiro António Santinha, como Responsável Após-Venda da empresa Renault Trucks Portugal, pela forma pronta como aceitou colaborar neste trabalho, e pela maneira acolhedora como sempre fomos recebidos na empresa.

Agradeço à minha família, o sacrifício em suportar os momentos de indisponibilidade da minha companhia, fruto das horas de isolamento em casa para trabalhos de escrita em computador. Assim como também, o incentivo constante para realização deste trabalho.



## Índice Geral

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	IV
<i>AGRADECIMENTOS</i> .....	VI
ÍNDICE GERAL.....	VII
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIII
1. Introdução.....	1
1.1. Âmbito da Tese.....	1
1.2. Estrutura da Tese .....	4
1.3. Contributo da Tese.....	5
2. Fiabilidade.....	6
2.1. O que é a Fiabilidade .....	6
2.2. Objectivo da Fiabilidade.....	8
2.3. Importância da Fiabilidade .....	9
2.4. Função de Fiabilidade e Vida dos Componentes.....	9
2.4.1. Fases da Vida .....	13
2.5. Distribuições de Vida (Modelos de Fiabilidade).....	16
2.5.1. Distribuição de Weibull.....	16
2.5.2. Distribuição Normal .....	23
2.5.3. Distribuição Exponencial.....	24
2.6. Fiabilidade de Sistemas .....	26
2.6.1. Sistema Série.....	27
2.6.2. Sistema Paralelo.....	28



---

2.6.3. Sistema Combinado .....	30
2.6.4. Sistema Paralelo Restrito ou Sistema “ $m$ em $n$ ” (“ $m$ -out-of- $n$ ”).....	31
2.6.5. Sistema Standby.....	32
2.6.6. Sistema Complexo .....	33
2.7. Conclusões do presente Capítulo .....	34
3. Degradação.....	35
3.1. Conceito de Degradação .....	35
3.2. Análise de Degradação .....	37
3.2.1. Análise de Curvas de Tendência.....	40
3.2.2. Metodologia aplicada na Análise de Degradação .....	43
3.2.3. Ensaios de Vida Acelerados de Degradação.....	46
3.2.4. Análise de Degradação – Vantagens versus Limitações.....	47
3.3. Modelos Matemáticos de Previsão .....	49
3.4. Intervalo P-F .....	54
3.5. Análise de Degradação no Apoio à Estratégia de Manutenção .....	57
3.6. Conclusões do presente Capítulo .....	62
4. Estudo Prático.....	63
4.1. Introdução .....	63
4.2. Breve Descrição do Sistema de Travagem .....	65
4.3. Componente em Estudo: Pastilhas de Travão.....	67
4.4. Factores de Influência no Modelo de Degradação do Componente .....	71
4.5. Equipamento de Diagnóstico .....	72
4.6. Dados Simulados .....	73
4.7. Simulação de um Caso Prático .....	74
4.8. Conclusões do presente Capítulo .....	89



5. Conclusões e sugestões para o Futuro.....	90
5.1. Conclusões .....	90
5.2. Sugestões para o Futuro .....	92
REFERÊNCIAS.....	94



## Lista de Acrónimos

### A

ADT - Accelerated Degradation Testing

### C

CBM - Condition-Based Maintenance

### E

EBS - Electronic Braking System

ESP - Electronic Stabilisation Programme

### F

FCP - Função Cumulativa de Probabilidade (*Cumulative Distribution Function*, CDF)

FDP - Função Densidade de Probabilidade (*Probability Density Function*, PDF)

FMEA - Failure Modes and Effect Analysis

FTA - Fault Tree Analysis

### M

MLE - Maximum Likelihood Estimation (Método da Máxima Verosimilhança)

MTBF - Mean Time Between Failure (Tempo Médio entre Falhas)

MTTF - Mean Time To Failure (Tempo Médio de Falha)

### R

RUL - Residual Useful Life

### T

TTF - Time to Failure



## Índice de Figuras

Figura 2.1: Gráfico de análise de ponto de equilíbrio.....	8
Figura 2.2: Representação gráfica de $R(t)$ e $F(t)$ .....	11
Figura 2.3: Curva da banheira ( <i>Bathtub curve</i> ).....	13
Figura 2.4: O efeito do parâmetro de forma de Weibull na FDP.....	20
Figura 2.5: O efeito do parâmetro, $\beta$ , de Weibull na função de taxa de avarias.....	21
Figura 2.6: O efeito de $\eta$ , na FDP de Weibull para o mesmo $\beta$ .....	22
Figura 2.7: O efeito de um parâmetro de localização positivo, $\gamma$ , na posição da FDP de Weibull.....	23
Figura 2.8: O efeito de $\sigma$ , na FDP da distribuição Normal para o mesmo parâmetro de localização $\mu$ .....	24
Figura 2.9: O efeito de $\lambda$ , na FDP da distribuição Exponencial.....	25
Figura 2.10: Diagrama de Blocos de um Sistema Série de $n$ componentes.....	28
Figura 2.11: Diagrama de Blocos de um Sistema Paralelo de $n$ componentes.....	29
Figura 2.12: Diagrama de Blocos de um Sistema “ $m$ em $n$ ” componentes.....	31
Figura 2.13: Diagrama de Blocos de um Sistema Standby, com um componente operativo e $n$ componentes em standby.....	32
Figura 3.1: Caminho de degradação em função do tempo: (a) crescente; (b) decrescente.....	40
Figura 3.2: Formas possíveis de curvas de degradação.....	41
Figura 3.3: Metodologia de Análise de Degradação.....	45
Figura 3.4: Representação da Curva do Modelo Linear.....	50
Figura 3.5: Representação da Curva do Modelo Exponencial.....	51
Figura 3.6: Representação da Curva do Modelo Potência.....	51
Figura 3.7: Representação da Curva do Modelo Logaritmico.....	52
Figura 3.8: Representação da Curva do Modelo de Gompertz.....	53
Figura 3.9: Representação do Modelo de Lloyd-Lipow.....	54
Figura 3.10: Curva P-F típica.....	55
Figura 3.11: Intervalo P-F.....	55
Figura 3.12: Evolução das medições em operação.....	57
Figura 4.1: Tractor Renault Premium Estrada HR DXi.....	64



---

Figura 4.2: Princípio de funcionamento do travão de escape.....	67
Figura 4.3: Pastilha de travão (ref <sup>o</sup> .n <sup>o</sup> 7421399929).....	68
Figura 4.4: Dispositivo de alerta MSK 5002.....	69
Figura 4.5: Sensor de desgaste.....	70
Figura 4.6: Painel de bordo com mensagem informativa.....	70
Figura 4.7: Resultados de um teste de avaliação da espessura das pastilhas de travão...73	
Figura 4.8: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “A”.....	78
Figura 4.9: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “B”.....	79
Figura 4.10: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “C”.....	80
Figura 4.11: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “D”.....	81
Figura 4.12: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “E”.....	82
Figura 4.13: Selecção da distribuição de Weibull triparamétrica.....	83
Figura 4.14: Gráfico da função Densidade de Probabilidade de Falha.....	84
Figura 4.15: Gráfico da função Fiabilidade.....	84
Figura 4.16: Gráfico da função Cumulativa da Probabilidade de Falha.....	85
Figura 4.17: Vida média das pastilhas.....	86
Figura 4.18: Tempo (quilómetros) para garantia de uma Fiabilidade de 0,90.....	86
Figura 4.19: Fiabilidade para uma missão de 200000 quilómetros.....	87
Figura 4.20: Fiabilidade Condicional para uma missão de 30000 quilómetros.....	87
Figura 4.21: Probabilidade de Falha para uma missão de 175000 quilómetros.....	88
Figura 4.22: Fiabilidade para uma missão de 220000 quilómetros.....	88



## Índice de Tabelas

Tabela 4.1: Valores simulados de percentagem de desgaste (NG3 – aparelho de diagnóstico) com indicação de espessura (e) restante e desgaste (d) correspondente, registados em intervalos de 50000 quilómetros, para uma frota de 5 veículos.....	76
Tabela 4.2: Valores do parâmetro desgaste (d), em cada roda referentes aos 5 veículos, registados em intervalos de 50000 quilómetros.....	77
Tabela 4.3: Valores dos parâmetros para o veículo “A”.....	78
Tabela 4.4: Valores dos parâmetros para o veículo “B”.....	79
Tabela 4.5: Valores dos parâmetros para o veículo “C”.....	80
Tabela 4.6: Valores dos parâmetros para o veículo “D”.....	81
Tabela 4.7: Valores dos parâmetros para o veículo “E”.....	82



---

# 1. Introdução

---

## 1.1. Âmbito da Tese

Hoje em dia, os fabricantes enfrentam um intenso crescimento, ao nível da competição global. Para permanecerem rentáveis, eles são desafiados a projectar, desenvolver, testar e fabricar produtos de alta fiabilidade, perante uma redução dos tempos no ciclo do produto, ao mesmo tempo que se confrontam com um rigoroso constrangimento de custos.

O rápido avanço tecnológico, o desenvolvimento de produtos altamente sofisticados, a intensa competição global e o acréscimo das expectativas dos consumidores são combinados, induzindo novas pressões nos fabricantes para produzir produtos de alta Qualidade. Os consumidores esperam adquirir produtos que sejam fiáveis e seguros. Este cenário requer um nível constante de aperfeiçoamento, de forma a satisfazer os consumidores. Esta satisfação depende directamente da Qualidade do bem. A Fiabilidade do bem é um aspecto marcante dessa Qualidade. Produzir um bem de alta qualidade implica produzir produtos com alta fiabilidade. Por esta razão, o



desenvolvimento dos testes de fiabilidade e de técnicas estatísticas é um factor muitíssimo importante, de forma a garantir uma posição competitiva no mercado.

A Engenharia da Fiabilidade tem desenvolvido um leque impressionante de ferramentas, no intuito de produzir produtos fiáveis. Para conhecer, assegurar e melhorar a fiabilidade, são utilizadas as tradicionais técnicas de FMEA, FTA, testes de vida ou testes de vida acelerados e análise dos tempos até à falha. Todas estas ferramentas continuam a ser importantes.

No entanto, com a redução dos prazos para desenvolvimento de produtos, tendência que se observa no cenário actual, os testes de fiabilidade têm de ser realizados com severas restrições de tempo. Tradicionalmente são usados testes de vida, que requerem somente a recolha de tempos até a falha, para estimar a fiabilidade de um produto ou componente. No entanto, algumas vezes, os testes de vida resultam em pouca ou nenhuma falha, dificultando a estimativa da fiabilidade, ou em durações de tempo muito prolongadas para realização dos ensaios, o que se torna inviável. Por estes motivos, e cada vez mais, são realizados testes de vida acelerados para a estimativa de fiabilidades (ou probabilidades de falha).

Em estudos de fiabilidade os testes de análise de degradação são uma alternativa válida aos tradicionais testes de tempo de vida e aos testes de tempo de vida acelerados. A análise de degradação é um modelo de cálculo particularmente eficiente para estimar a fiabilidade em componentes ou sistemas altamente fiáveis, em que a ocorrência de falhas é rara e por vezes inexistente. Tendo ainda em conta, que este grande benefício significa uma redução apreciável, na duração dos testes de fiabilidade.

Quando um bem está sujeito a um processo de degradação, onde se pode fixar um valor limite para a característica de desempenho que está a ser medida, pode-se recolher uma série de dados relativos ao processo em causa, servindo estes para ajustar um modelo matemático de degradação. Este modelo de degradação será então utilizado para prever a falha, ou seja, quando o componente atingirá o valor limite preestabelecido. O modelo de degradação é função de uma determinada curva de tendência, que ao ser extrapolada permite determinar o tão importante valor de tempo até à falha TTF.

---



O valor do TTF é de um potencial para a Engenharia da Fiabilidade de um bem, pois através dele é possível obter outros valores estatísticos que permitirão caracterizar o mesmo, como sejam: a função densidade de probabilidade, a função de probabilidade de falha acumulada, a função de fiabilidade, a taxa de avarias, o MTBF, etc.

A gestão da manutenção deve ser encarada como uma actividade crucial para a sobrevivência e para o sucesso de qualquer empresa, por isso deve ser gerida de uma forma estratégica.

No controlo de condição dos equipamentos um dos métodos aplicados é o acompanhamento da tendência, onde se procede à medição periódica ou contínua de um ou vários parâmetros indicadores da condição de funcionamento do equipamento. Com base nos valores medidos pode elaborar-se uma tendência que permite determinar quando o nível de degradação do equipamento atinge um valor crítico.

Nas políticas clássicas de manutenção preventiva, alguns elementos são substituídos antes da completa exploração da sua vida útil, representando uma perda significativa de meios humanos e materiais, o que acarreta um avultado no prejuízo económico.

Por conseguinte, a implementação da manutenção condicionada é mais apropriada. Em particular, por um sistema monitorizado, que segue em tempo real o processo de degradação, e que é possível intervir só quando é estritamente necessário.

De facto, com base na informação recolhida por um sistema monitorizado, e aplicando um modelo estocástico que descreva o processo de degradação, é possível prever o tempo de falha e consequentemente programar as acções de manutenção em tempo útil.

A modelação dos tempos até à falha por meio da extrapolação dos dados de degradação é outro objectivo desta dissertação, com vista à optimização das tarefas da manutenção condicionada. Na modelação estatística é utilizada a aplicação informática, *Weibull* ++7..



## 1.2. Estrutura da Tese

Para consecução do âmbito definido, este estudo foi dividido em 5 capítulos, e que podem ser descritos da seguinte forma:

- O Capítulo 1 constitui o âmbito, estrutura e o contributo do trabalho.
- O Capítulo 2 é composto pela apresentação de fundamentos teóricos de Engenharia da Fiabilidade, onde assenta método desenvolvido no trabalho.
- O Capítulo 3 é descrito a metodologia desenvolvida neste trabalho, e o estado da arte. As vantagens do método em relação aos métodos convencionais de cálculo de fiabilidade. O grande contributo da sua aplicação na Estratégia de Manutenção, nomeadamente na Manutenção Condicionada e na optimização de políticas de manutenção. É apresentado de que forma se enquadra no Plano estratégico de Manutenção. São ainda referidos os modelos matemáticos mais usuais que servem de base ao método.
- O Capítulo 4 é inteiramente dedicado à aplicação prática do método, tendo por base a utilização de dados simulados. O estudo é focado na análise do mecanismo de degradação de desgaste associado ao componente mecânico das pastilhas de travão, com o objectivo de estimar toda a informação de fiabilidade do mesmo, e particularmente a sua vida útil restante.
- O Capítulo 5 é feito um realce às principais conclusões e a indicação de caminhos para desenvolvimento de um modelo estatístico que possa dar sequência aos factores de influência de degradação identificados, mas que as limitações, na obtenção de dados reais não permitiram concretizar.



### **1.3. Contributo da Tese**

Esta dissertação pretende mostrar a importância do processo de acompanhamento e análise da degradação de componentes mecânicos, especialmente quando estão em causa custos elevados ou quando estes têm implicações importantes na segurança. A metodologia demonstrada neste documento poderá ser testada e implementada em diversos bens, com os necessários ajustes.

A grande vantagem desta metodologia prende-se com o facto de não ser necessária a ocorrência de falhas para obter informação sobre a fiabilidade do componente em causa. Outra vantagem que indirectamente se pode extrair destes modelos de degradação é poder-se estimar a vida média restante, extrapolando a curva de degradação até esta se cruzar com a ordenada correspondente ao valor limite admissível.

Os modelos não são em si mesmos, um fim, mas antes um elo de uma cadeia circular de melhoria contínua de compreensão e mais perfeita simulação da realidade



---

## 2. Fiabilidade

---

### 2.1. O que é a Fiabilidade

O conceito de fiabilidade está associado à ideia de um bem operar com sucesso, ou de ausência de avarias, ou ainda de disponibilidade. De acordo com a Norma NP EN 13306 [1], a fiabilidade<sup>1</sup> é definida como sendo a:

*“Aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo.”*

Podemos então considerar a fiabilidade, como uma probabilidade de sucesso, e portanto a probabilidade complementar da respectiva probabilidade de falha, tratando-se de dois acontecimentos mutuamente exclusivos. Quando se refere que um determinado bem está num estado de falha, ou de avaria<sup>2</sup> [1] entendida como:

---

<sup>1</sup> O termo “fiabilidade”, também é utilizado como uma medida de desempenho da fiabilidade e poderá também ser definido como uma probabilidade [1].

<sup>2</sup> “Avaria” é um acontecimento. “Em falha” é um estado.

---



*“A cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida.”*

Podemos inferir que o mesmo pura e simplesmente cessou o seu funcionamento, ou noutros casos estamos perante a simples degradação de algum dos parâmetros de desempenho, para além de um nível limite preestabelecido.

O que reflecte, aliás, a seguinte definição mais específica de avaria [2]:

*“ Avaria é a manifestação da inaptidão de um dado item realizar um determinado padrão de desempenho previamente especificado ”.*

Quanto à interpretação das condições em que um item é suposto operar, podemos numa forma simplista, defini-las em dois grupos fundamentais:

- Cargas de serviço (forças, binários, choques, intensidade de corrente eléctrica, etc.);
- Efeitos do meio ambiente (temperatura, humidade, salinidade, etc.).

Os dados de fiabilidade de um determinado bem, resultam essencialmente de duas fontes:

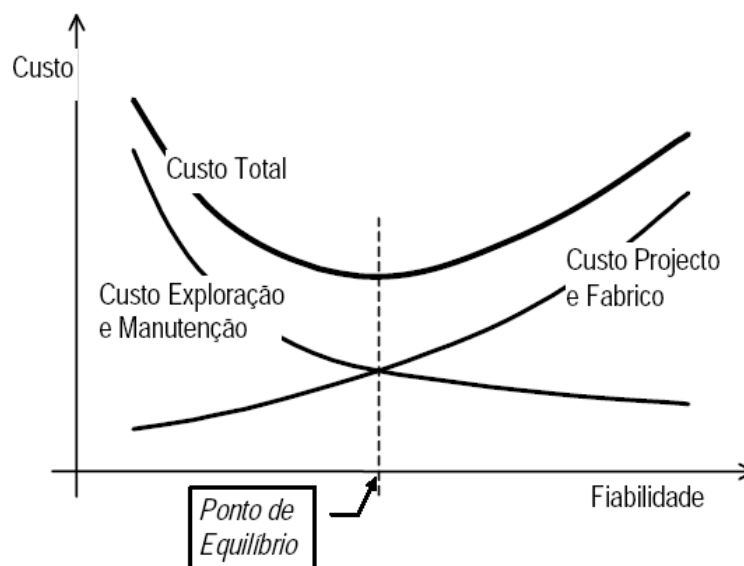
- Os fabricantes, que por meio de ensaios de fiabilidade baseados num esquema de amostragem predefinido, recolhem deste modo resultados independentes da aplicação real. É a denominada fiabilidade **inerente, intrínseca, previsional** ou também **à saída da fábrica**.
- Os utilizadores, que a partir da sua experiência real em serviço podem fornecer os dados operacionais ao fabricante para tratamento estatístico, sendo esta informação de extrema importância pois resulta da aplicação prática do bem. Esta é definida como a fiabilidade **demonstrada, extrínseca, operacional** ou **em serviço**.

## 2.2. Objectivo da Fiabilidade

O desenvolvimento tecnológico obriga à concepção e fabrico de produtos com cada vez mais elevadas características de desempenho (“*performance*”), ou seja, os equipamentos operam a níveis de carga superiores, ao mesmo tempo que incorporam um maior grau de complexidade.

Nesse sentido, o grande desafio para a Engenharia da Fiabilidade passa por responder às melhorias de desempenho pretendidas, mantendo ou até melhorando os níveis de fiabilidade.

É ainda necessário alcançar um compromisso entre o nível de fiabilidade desejado e o custo na produção do mesmo, com o objectivo de optimização global, isto é, em função do tipo de aplicação do bem, deverão ser especificados os chamados requisitos de fiabilidade. A optimização do equilíbrio entre custos de fiabilidade versus custos da não fiabilidade, está ilustrada no gráfico de ponto de equilíbrio, conforme Figura 2.1.



**Figura 2.1: Gráfico de análise de ponto de equilíbrio [2].**



### 2.3. Importância da Fiabilidade

A Engenharia da Fiabilidade procura suprir a necessidade das empresas de conhecer e controlar a vida útil dos seus bens ou activos físicos. Só assim se poderão reduzir os custos, sem comprometer a Qualidade, a Segurança e a Disponibilidade destes, fornecendo ao mesmo tempo a garantia de que o bem exercerá a sua função no período determinado, com poucas ou nenhuma falha.

Os estudos de fiabilidade fornecem informações, que uma vez compiladas e analisadas, permitem estimar por meio de modelos estatísticos, o tempo no qual um sistema estará disponível, informação fundamental tanto para o estabelecimento do tempo de garantia de um determinado bem, quanto para o processo de tomada de decisão associado à gestão da manutenção.

### 2.4. Função de Fiabilidade e Vida dos Componentes

O termo fiabilidade representa a probabilidade de sucesso ou percentagem de sucesso. Se  $T$  é o tempo de falha estocástico de um dado equipamento, a expressão matemática da sua fiabilidade em “ $t$ ” virá:

$$R(t) = P(T > t) \quad (2.1)$$

A função complementar da fiabilidade é a função de probabilidade de falha,  $F(t)$ , mais tecnicamente designada por **função cumulativa de probabilidade** (FCP) de falha. A função de probabilidade de falha representa a repartição dos tempos de falha, numa amostra de componentes idênticos submetidos a um determinado ensaio de fiabilidade. Assim, a FCP para um tempo “ $t$ ” é dada pela seguinte expressão probabilística:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - P(T > t) = P(T < t) \quad (2.2)$$



Ao derivar a função de probabilidade de falha obtém-se a conhecida função de densidade de probabilidade,  $f(t)$ , expressa por:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Pela análise da expressão (2.3) conclui-se que esta representa uma função de probabilidade instantânea de uma variável aleatória contínua, neste caso a probabilidade instantânea de falha em  $t$ . Pode-se assim dizer que  $f(t)$  representa a **função de densidade de probabilidade** (FDP) de falha.

Procedendo à operação matemática de reintegração de  $dF(t)/dt$  em (2.3), teremos como resultado a probabilidade acumulada de falha entre os limites de integração, e tendo em conta que o limite inferior dessa reintegração é  $t=0^3$ , esta probabilidade é a sobejamente reconhecida **probabilidade de falha**,  $F(t)$ :

$$F(t) = \int_0^t f(t).dt \quad (2.4)$$

Recorrendo à relação de complementaridade entre  $F(t)$  e  $R(t)$ :

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (2.5)$$

Poder-se-á agora a partir de (2.4), por meio da relação de (2.5) chegar à conhecida **função de fiabilidade**,  $R(t)$ :

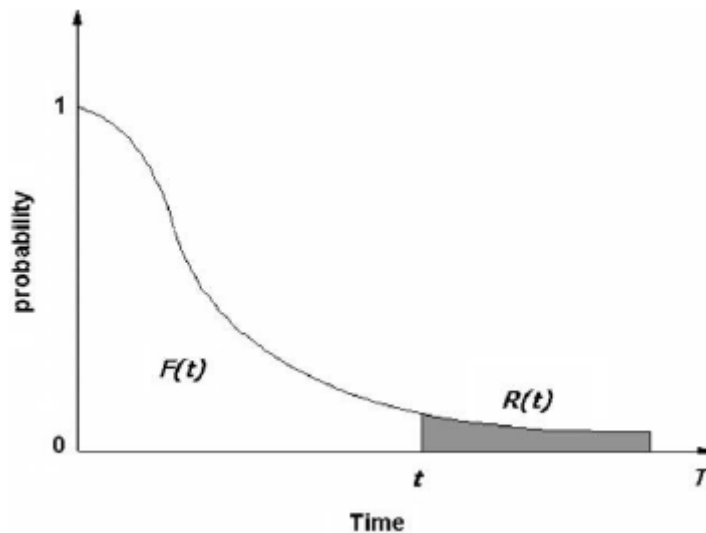
$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t).dt = \int_t^{\infty} f(t).dt \quad (2.6)$$

---

<sup>3</sup> O integral de  $dF(t)/dt$  que se obtivesse para um limite inferior de integração superior a  $t=0$  constituiria uma probabilidade acumulada incondicional e, como tal, não correspondendo à verdadeira probabilidade de falha.

---

As funções de probabilidade de falha e a fiabilidade em função de  $f(t)$ , considerando o limite inferior de  $f(t)$ ,  $t=0$ , encontram-se ilustradas na Figura 2.2.



**Figura 2.2: Representação gráfica de  $R(t)$  e  $F(t)$ .**

A função  $R(t)$  é uma função contínua em  $t$ , geralmente decrescente a partir do instante de início em serviço.

Uma análise da frequência com que ocorrem as avarias de um determinado tipo de componente, ou equipamento, ao longo da sua operação, permite traçar o seu padrão de avaria.

Existe ainda outro importante indicador no estudo da fiabilidade de qualquer componente, conhecido pela designação técnica de **taxa de avarias**,  $\lambda(t)$ , e que aparece difundido na literatura técnica por uma variedade de outros nomes, como:

- Taxa de risco (*hazard rate*,  $h(t)$ );
- Taxa de falha;
- Taxa instantânea de avarias;
- Taxa instantânea de risco;
- Taxa de mortalidade.



Neste trabalho será usado exclusivamente o termo taxa de avarias. A função  $\lambda(t)$  trata-se de uma probabilidade instantânea condicional de falha, já que representa a taxa a que os componentes estão a falhar por unidade de tempo, no instante  $t$ .

A taxa de avarias pode ser definida por uma relação de probabilidades, dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.7)$$

Resultando na **Equação Geral da Função de Fiabilidade**:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t).dt} \quad (2.8)$$

Sempre que houver informação disponível referente aos tempos que mediaram entre as sucessivas falhas de um componente, é possível calcular uma importante medida da fiabilidade, o designado tempo médio de falha, MTTF (“*Mean Time to Failure*”), o qual pode ser obtido, usando uma das seguintes equações:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t).dt \quad (2.9)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} t.f(t).dt \quad (2.10)$$

O MTTF é um indicador importante para a definição da fiabilidade de um bem. Existe ainda outra definição estatística, o MTBF (“*Mean Time Between Failures*”), que não é mais do que uma forma particular do MTTF. Nota-se que na prática se recorre ao uso indiscriminado da sigla MTBF, independentemente do tipo de componente em análise, mas que importa aqui diferenciar:

- MTTF – usa-se no caso de componentes não reparáveis, sendo substituídos por componentes novos à medida que vão falhando (e.g.: lâmpadas, rolamentos, etc.);
- MTBF – usa-se no caso de componentes, ou sistemas reparáveis, os quais à medida que vão falhando, são desmontados e reparados (e.g.: caixas redutoras, motores eléctricos, etc.).

### 2.4.1. Fases da Vida

As funções de distribuição de densidade de probabilidade de falha, de taxa de avarias, de probabilidade acumulada de falha e de fiabilidade, podem ser consideradas como leis de vida dos componentes.

Estas leis de vida são representadas graficamente pelas denominadas **curvas de mortalidade**. Na figura abaixo está representada a curva da taxa de avarias,  $\lambda(t)$ , que em virtude da sua peculiar forma, é reconhecida pela popular designação de “curva da banheira” (“*Bathtub hazard rate curve*”).

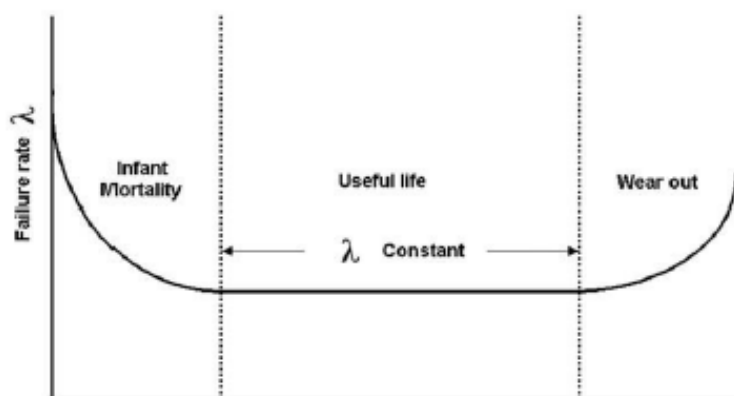


Figura 2.3: Curva da banheira (*Bathtub curve*).

Matematicamente a curva da banheira, da figura 2.3, pode ser representada utilizando a seguinte função [3]:



$$\lambda(t) = \theta \cdot \lambda \cdot \beta \cdot t^{\beta-1} + (1 - \theta) \cdot b \cdot t^{b-1} \cdot \alpha \cdot e^{\alpha \cdot t^b} \quad (2.11)$$

Para  $\beta, b, \lambda$  e  $\alpha > 0$ ;  $0 \leq \theta \leq 1$ ;  $\beta = 0.5$ ,  $b = 1$  e  $t \geq 0$ .

E onde:

$\lambda(t)$  - taxa de avarias;

$t$  - tempo;

$\alpha, \lambda$  - parâmetros de escala;

$\beta, b$  - parâmetros de forma.

A “curva da banheira” em particular, é representada por três fases, ou períodos característicos de comportamento, nomeadamente: período de mortalidade infantil, período de vida útil e período de desgaste.

### **Período de Mortalidade Infantil**

A análise do período de mortalidade infantil refere-se ao componente quando é novo, e que tende a manifestar uma elevada taxa de avarias que, no entanto, decrescerá mais ou menos rapidamente. Este facto deve-se nomeadamente a deficiências do projecto, a defeitos de fabrico, a uma montagem ou instalação incorrecta, entre outros.

A forma de minimizar este problema, passa por estabelecer políticas de rigor ao nível do projecto e do fabrico, complementadas com a realização de ensaios prévios à efectiva entrada em serviço.

### **Período de Vida Útil**

No período de vida útil de um componente, a taxa instantânea de avarias  $\lambda(t)$ , é aproximadamente constante, pois não depende do tempo e designa-se simplesmente por taxa de avarias  $\lambda$ . Este facto, leva a que, quer a função de densidade de probabilidade  $f(t)$ , quer a função de fiabilidade  $R(t)$ , sejam funções exponenciais negativas. Logo, considerando  $\lambda=c^{te}$  nas expressões (2.7) e (2.8), obteremos:



$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t).dt} = e^{-\lambda.t} \quad (2.12)$$

$$f(t) = \lambda(t).R(t) = \lambda.e^{-\lambda.t} \quad (2.13)$$

O cálculo da fiabilidade é desta forma simplificado durante o período de vida útil, e por isso se tende a adoptar o modelo de vida útil (taxa avarias constante) à generalidade dos casos práticos, sempre que o erro inerente a tal aproximação seja admissível.

Outro aspecto associado ao modelo de vida útil, é o de se verificar que o valor da taxa de avarias é exactamente igual ao inverso do MTBF.

$$\begin{aligned} MTF \equiv MTBF &= \int_0^{\infty} R(t).dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda.t} .dt = \\ &= \left[ \frac{e^{-\lambda.t}}{-\lambda} \right]_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} \end{aligned} \quad (2.14)$$

### **Período de Desgaste**

O maior interesse na análise deste período está no facto de se tentar conhecer o seu provável início, para que uma possível entrada em regime de desgaste possa ser evitada. O início do período de desgaste acarreta um aumento progressivo da taxa instantânea de avarias, derivado ao fenómeno de degradação, com as indesejáveis consequências económicas e de segurança que daí possam advir. Por essa razão, se justifica implementar uma política de manutenção preventiva, que possa levar a cabo uma acção de reparação, ou substituição do componente, com o objectivo de prolongar a sua vida nominal. Uma função Normal de probabilidade de falha ajusta-se satisfatoriamente a este período de desgaste.



Apesar de serem facilmente reconhecidas, cabe aqui, mencionar algumas das principais razões que contribuem para a ocorrência de falhas nos três períodos característicos da “curva da banheira”:

- Período de Mortalidade Infantil – Controlo de qualidade deficiente, erros de concepção, defeitos de fabrico, instalação incorrecta e rodagem deficiente ou insuficiente;
- Período de Vida Útil – Erros humanos, falhas naturais, solicitações de operação superiores às projectadas e avarias acidentais;
- Período de Desgaste – Fadiga, corrosão, desgaste, manutenção deficiente e práticas de revisão incorrectas.

## **2.5. Distribuições de Vida (Modelos de Fiabilidade)**

De seguida são apresentadas algumas distribuições estatísticas mais usuais, utilizadas na realização de estudos de fiabilidade, como sejam a distribuição Exponencial, a distribuição Normal e a distribuição de Weibull com particular destaque.

### **2.5.1. Distribuição de Weibull**

A distribuição de Weibull foi criada em 1937 pelo sueco Waloddi Weibull como base para a sua investigação de fadiga dos materiais, tendo sido apresentada cientificamente nos Estados Unidos em 1951 [4]. Desde então centenas de artigos científicos têm sido publicadas fazendo alusão à distribuição de Weibull e suas inúmeras aplicações.

A distribuição de Weibull é o método preferido usado por engenheiros e cientistas em fiabilidade, e em particular na análise de modos de falha, devido à sua versatilidade na descrição do tempo de vida até à falha, de componentes sujeitos a fenómenos de degradação (desgaste, corrosão, fadiga, fluência, etc.), ou seja, por apresentar uma



notável capacidade de ajustamento a uma grande variedade de possíveis formas de distribuições de probabilidade reais.

Esta grande flexibilidade deriva do facto de a fórmula geral da distribuição de Weibull ser composta por três parâmetros, que em função dos valores que possam tomar, se adaptará a qualquer período da vida do bem (fase de mortalidade infantil, vida útil ou fase de desgaste). A forma geral da distribuição de Weibull para a FDP, de três parâmetros é expressa por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (2.15)$$

Onde os parâmetros,  $\gamma$ ,  $\eta$  e  $\beta$  possuem o seguinte significado:

- $\gamma$ : Parâmetro de localização, ou vida sem avarias que define o limite inferior do domínio de  $t$  considerado;
- $\eta$ : Parâmetro de escala ou vida característica, que define o ponto correspondente a uma probabilidade de falha de 63,2%;
- $\beta$ : Parâmetro de forma ou inclinação, que traduz o mecanismo de degradação (física da falha). Define a forma da distribuição.

Se integrarmos a expressão anterior entre  $t_0$  e  $t$ , obtemos a equação da **função de probabilidade de falhas acumulada** (FCP):

$$F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (2.16)$$

Lembrando que a função da fiabilidade corresponde à função complementar da FCP, obtém-se a **função de fiabilidade** da distribuição de Weibull de três parâmetros, representada pela seguinte expressão:

$$R(t) = e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (2.17)$$

Tendo em conta que a **taxa de avarias** se nos apresenta como uma relação de probabilidades entre  $f(t)$  e  $R(t)$ , obtém-se:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (2.18)$$

Pode-se ainda explicitar a **função de fiabilidade condicional**, dada por:

$$R(t|T) = \frac{R(T+t)}{R(T)} = \frac{e^{-\left(\frac{T+t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}}{e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta}} \quad (2.19)$$

A distribuição de Weibull goza ainda da particularidade de poder ser definida não só a partir de  $t=0$ , como a partir de um determinado instante  $t = \gamma > 0$ .

Nos casos em que o limite inferior de vida toma o valor nulo,  $\gamma=0$ , estamos perante numa simples distribuição de Weibull de dois parâmetros ( $\eta$  e  $\beta$ ), cuja respectiva função densidade de probabilidade de falha, FDP, é dada pela expressão:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.20)$$

Vejamos agora algumas particularidades associadas a esta distribuição:

- A distribuição exponencial é um caso especial da distribuição de Weibull para  $\beta=1$ ;
- O parâmetro de escala,  $\eta$ , representa o tempo expectável de falha para 63,2% de uma dada população [4].



Resta acrescentar que os valores dos parâmetros necessários para a concretização das expressões anteriores, terão de ser obtidos experimentalmente a partir da análise do comportamento real de uma adequada amostra dos componentes em causa, ou através de ensaios.

### **Características da Distribuição de Weibull**

Dependendo dos valores dos parâmetros da distribuição de Weibull é possível modelar uma vasta diversidade de comportamentos de vida. Ir-se-á nesta secção verificar os efeitos dos diferentes valores dos seus parâmetros, na forma geral da distribuição de Weibull (i.e., a sua forma de três parâmetros).

#### **Parâmetro de Forma, $\beta$**

Diferentes valores do parâmetro de forma ( $\beta$ ) vão gerar alterações no comportamento da distribuição. Com efeito, existem determinados valores do parâmetro de forma que aplicados na equação de distribuição são casos especiais de outras distribuições. Por exemplo, a distribuição exponencial é um caso especial da distribuição de Weibull para  $\beta=1$ , cujo valor aplicado na equação (2.15) resulta a expressão da FDP simplificada:

$$f(t) = \frac{1}{\eta} \cdot e^{-\frac{t-\gamma}{\eta}} \quad (2.21)$$

A Figura 2.4 mostra o efeito de diferentes valores do parâmetro de forma,  $\beta$ , na forma da função de densidade de probabilidade. Como se pode verificar há uma variedade de formas, dependendo do valor de  $\beta$ .

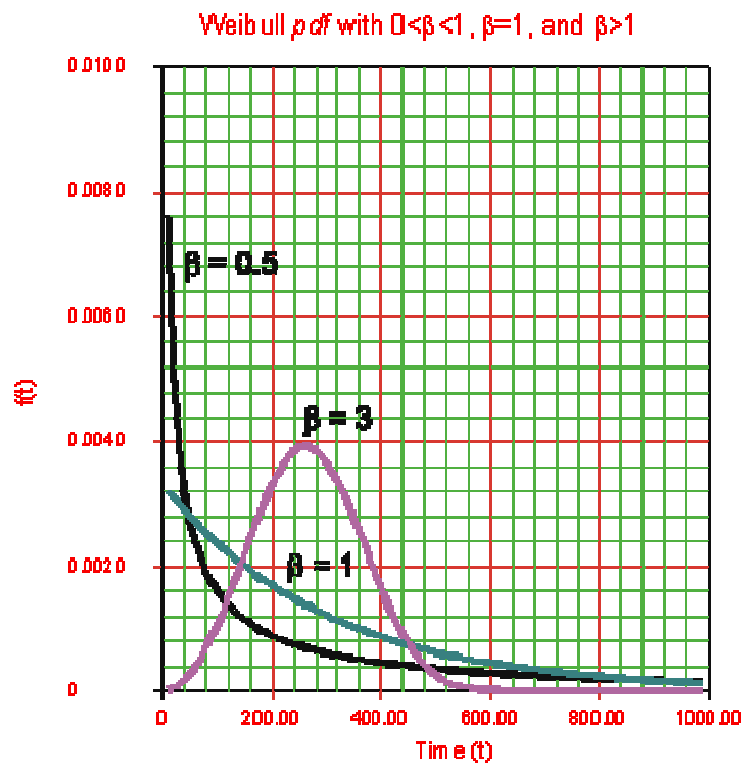


Figura 2.4: O efeito do parâmetro de forma de Weibull na FDP [5].

- $\beta = 1$ , a  $f(t)$  descreve uma distribuição Exponencial com  $\lambda = 1/\eta$ ;
- $\beta < 1$ , a  $f(t)$  aproxima-se de uma distribuição Gamma;
- $\beta > 1$ , a  $f(t)$  aproxima-se de uma distribuição Normal para  $\beta=3.4$  e de uma distribuição Rayleigh para  $\beta=2$ .

O valor de  $\beta$  tem desta forma um efeito marcante na taxa de avarias, podendo definir-se as características de avaria das populações, em função do valor de  $\beta$ , conforme se pode verificar através da Figura 2.5.

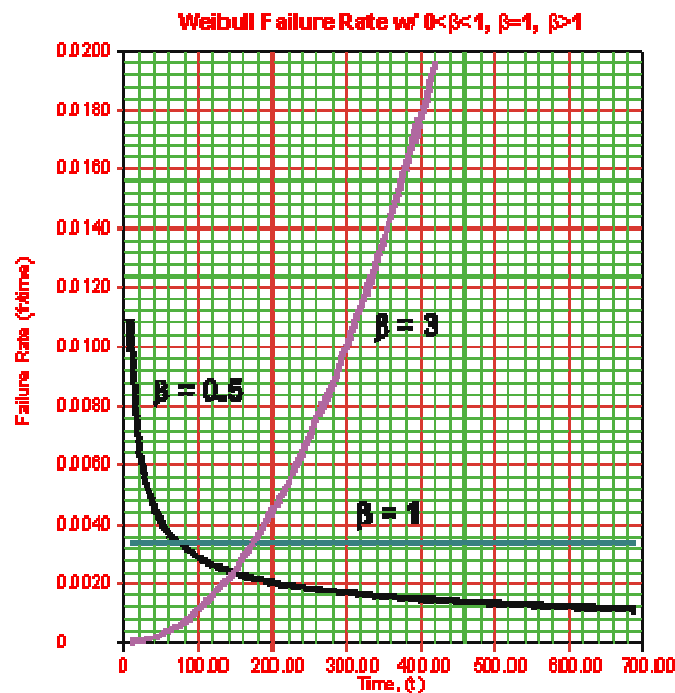


Figura 2.5: O efeito do parâmetro,  $\beta$ , de Weibull na função de taxa de avarias [5].

- $\beta = 1$ , a função de taxa de avarias é constante (consistente com uma distribuição exponencial), apropriado para representar o período de vida útil;
- $\beta > 1$ , a função de taxa de avarias é crescente, este comportamento é apropriado para representar a taxa de avarias no período de desgaste;
- $\beta < 1$ , a função de taxa de avarias é decrescente, este comportamento é apropriado para representar a taxa de avarias no período de mortalidade infantil.

Note-se que esta função pode aplicar-se indiferentemente aos três períodos de vida de um bem, pois retrata o comportamento da curva da banheira, que pode ser modelada pela distribuição de Weibull, fazendo variar o seu parâmetro de forma,  $\beta$ .

### Parâmetro de Escala, $\eta$

A alteração do valor do parâmetro de escala ( $\eta$ ) tem também efeitos na distribuição, provocando alterações na escala das abcissas. Um aumento do valor de  $\eta$ , mantendo  $\beta$ , constante tem o efeito de estender a curva FDP para a direita, baixando a sua altura.

Visto que a área abaixo da curva FDP tem um valor constante, o “pico” da curva FDP irá baixando com o aumento de  $\eta$ , como se ilustra na Figura 2.6.

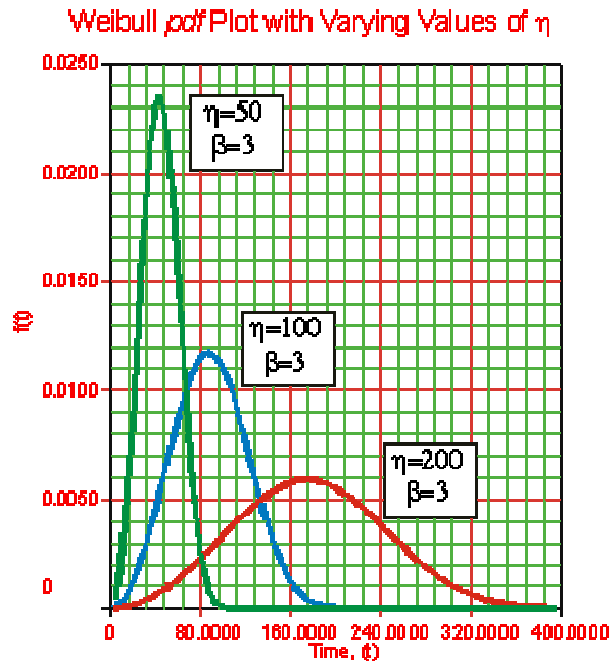


Figura 2.6: O efeito de  $\eta$ , na FDP de Weibull para o mesmo  $\beta$  [5].

O parâmetro de escala ( $\eta$ ) assume as mesmas unidades de  $t$ , isto é, em horas, quilómetros, ciclos, actuações, etc.

### Parâmetro de Localização, $\gamma$

O parâmetro de localização ( $\gamma$ ), como o próprio nome indica, situa a distribuição ao longo da abcissa. A mudança do valor de  $\gamma$  faz deslocar a distribuição, e nesse sentido a função situa-se à direita (se  $\gamma > 0$ ) ou à esquerda (se  $\gamma < 0$ ). A Figura 2.7 abaixo, representa o efeito de deslocamento positivo do parâmetro  $\gamma$ , na FDP.

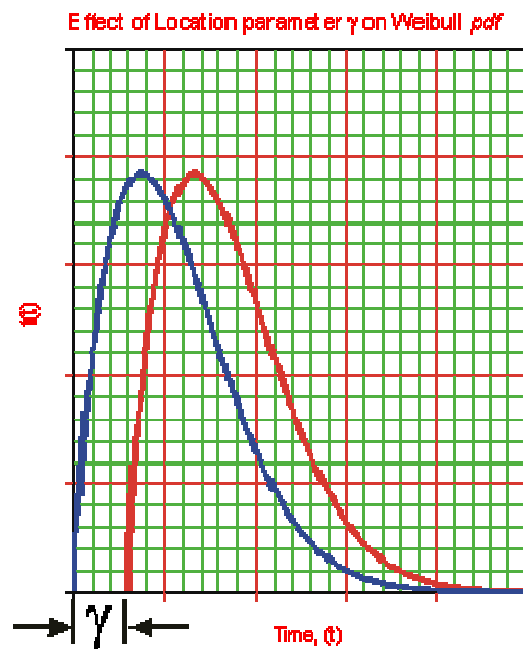


Figura 2.7: O efeito de um parâmetro de localização positivo,  $\gamma$ , na posição da FDP de Weibull [5].

Quando  $\gamma=0$ , a distribuição tem início em  $t=0$ , ou seja na origem. Um valor de  $\gamma$  negativo pode indicar que houve avarias ocorridas antes do início do teste, nomeadamente durante a produção, no armazenamento, no transporte, durante a vistoria antes do início de uma missão, ou antes do uso real. Este parâmetro também assume as mesmas unidades de  $t$ , isto é, em horas, quilómetros, ciclos, actuações, etc.

### 2.5.2. Distribuição Normal

A distribuição Normal ajusta satisfatoriamente o comportamento de avarias de uma dada população quando esta atinge o período de desgaste, ou seja, quando a sua taxa de avarias passa a crescer acentuadamente com a idade. É aplicada quando as falhas ocorrem em torno de um valor médio, de forma simétrica.

A distribuição Normal caracteriza-se por dois parâmetros:

- A média  $\mu$  – parâmetro de localização;

- A variância  $v$  (ou  $\sigma^2$ ) – parâmetro de escala, onde  $\sigma$  representa o desvio padrão.

A função de densidade de probabilidade  $f(t)$ , é determinada pela expressão:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - T_m}{\sigma} \right)^2} \quad \text{para } -\infty < t < \infty \quad (2.22)$$

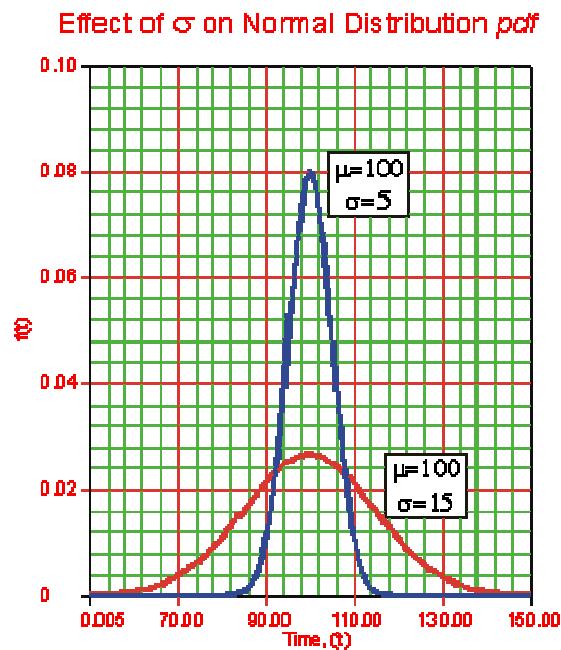


Figura 2.8: O efeito de  $\sigma$ , na FDP da distribuição Normal para o mesmo parâmetro de localização  $\mu$  [5].

### 2.5.3. Distribuição Exponencial

A distribuição Exponencial é caracterizada por uma taxa de avarias constante,  $\lambda(t) = \lambda > 0$ , propriedade associada ao período de vida útil. É indicada para situações onde as falhas ocorrem de uma forma aleatória.

A função Exponencial possui um único parâmetro: o valor médio (taxa média de avarias,  $\lambda$ ), ou o seu inverso (tempo médio entre falhas, MTBF).

A expressão 2.23 mostra a função densidade de probabilidade da distribuição Exponencial:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{para } t > 0 \quad (2.23)$$

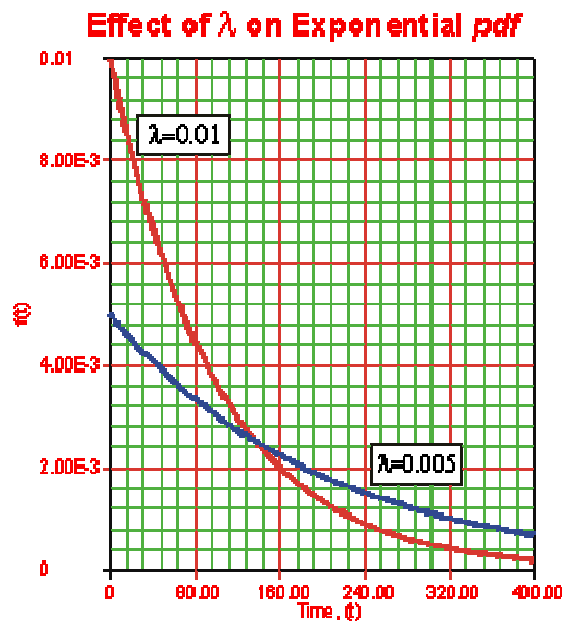


Figura 2.9: O efeito de  $\lambda$ , na FDP da distribuição Exponencial [5].

Após definida a distribuição a aplicar, é necessário estimar os parâmetros a usar nessa distribuição com o objectivo de ajustar cada modelo aos dados, tendo por base o conjunto de dados de falha disponíveis. O ajuste a cada modelo pode ser efectuado através de vários métodos.

Este procedimento começa por encontrar uma função não paramétrica, que defina a probabilidade de falha, usando para tal conhecidos métodos como: o método de Kaplan-Meier, ou o método da categoria mediana (“*median rank*”). Neste último caso o cálculo possa ser simplificado, fazendo uso de uma fórmula aproximada, também referida por aproximação de Bernard, cuja expressão é definida por:



$$MR = \frac{j - 0,3}{N - 0,4} \quad (2.24)$$

Onde:

$N$  – dimensão da amostra;

$j$  – número de ordem.

De seguida procede-se ajuste dessa função não paramétrica, a um dos modelos de fiabilidade anteriormente referidos, com recurso a métodos sobejamente conhecidos como sejam:

- Regressão Linear – que consiste em linearizar a função de probabilidade de falha, para obter a forma  $Y = AX + B$ ;
- Método da Máxima Verosimilhança (“*Maximum Likelihood Estimation, MLE*”) – é um método estatístico de estimativa de parâmetros, considerado o mais consistente.

## 2.6. Fiabilidade de Sistemas

Em fiabilidade, um **sistema** é definido como sendo [2]:

*“ Um conjunto de elementos (os componentes do sistema), organizado de um modo lógico para o desempenho de uma determinada função ”.*

Um sistema é assim constituído por diversos componentes, os quais podem ser considerados como funcionando numa lógica série, ou numa lógica paralelo, ou mais geralmente, numa lógica combinada do tipo série-paralelo, formando um sistema misto.

O sistema série é por natureza dotado de uma baixa fiabilidade, e a forma de contrariar essa característica passa por introduzir no sistema elementos redundantes, em paralelo



com os componentes em série menos fiáveis do sistema. Dizemos, então, que conferimos redundância ao sistema.

No entanto, existem casos em que não é possível a instalação no sistema de um componente redundante, que opere em simultâneo com o componente primário, deixando desta forma de se poder formar um paralelo activo, ou constituir uma **redundância activa**.

Nestes casos, a solução passa por instalar o componente redundante em paralelo passivo, ou seja, o componente secundário só entra em operação após a ocorrência da falha no componente primário. Será assim, conferida ao sistema uma **redundância passiva**, designando-se o mesmo também de sistema paralelo passivo ou sistema “*standby*”.

Na realidade, e hoje em dia, os equipamentos e sistemas reais são na sua maioria bastante complexos, dificultando a sua estruturação em sistemas simples, como os anteriormente referidos, sendo por isso conhecidos por sistemas complexos.

### 2.6.1. Sistema Série

Esta é provavelmente a configuração mais comum em sistemas de Engenharia. Para o sucesso do sistema série é necessário que todos os componentes estejam a funcionar normalmente, ou seja, é requerido o sucesso de todos os componentes.

Considerando um sistema constituído por  $n$  componentes independentes<sup>4</sup> em que cada um desempenhe uma função essencial ao desempenho global do sistema, podemos representar o sistema recorrendo a um diagrama de blocos, em que cada bloco simboliza um componente, como ilustra a Figura 2.10.

---

<sup>4</sup> Um componente é considerado independente, se a sua fiabilidade é independente do facto dele se apresentar sozinho, ou em conjunto com outros componentes no sistema em análise.



**Figura 2.10: Diagrama de Blocos de um Sistema Série de  $n$  componentes.**

A fiabilidade do sistema série será expressa em função das fiabilidades dos seus componentes, pela aplicação do teorema do produto de probabilidades aos componentes independentes, da seguinte forma:

$$R_{SS}(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.25)$$

Aplicando a esta fórmula, a equação geral da fiabilidade explicitada em (2.7) virá:

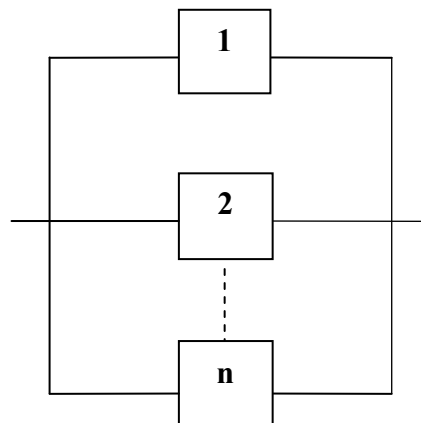
$$R_{SS}(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) \cdot dt} = e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \cdot dt} \quad (2.26)$$

Donde se deduz que a taxa de avarias do sistema série é igual à soma das taxas de avarias dos seus componentes, isto é:

$$\lambda_{SS}(t) \equiv \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \cdot dt \quad (2.27)$$

### 2.6.2. Sistema Paralelo

Neste caso o sistema é composto por  $n$  componentes que operam em simultâneo e redundantemente, obrigando a que pelo menos um componente funcione normalmente para que o sistema tenha sucesso. Estamos, neste caso, na presença de um sistema paralelo activo.



**Figura 2.11: Diagrama de Blocos de um Sistema Paralelo de  $n$  componentes.**

De forma a facilitar as operações matemáticas no sistema paralelo<sup>5</sup>, e em virtude da condição de complementaridade existente entre a fiabilidade e a probabilidade de falha, este problema será abordado não numa lógica de sucesso, mas sim numa lógica de falha. Assim sendo, o sistema falha quando todos os seus componentes estejam em estado de falha, o que se traduz na seguinte expressão:

$$F_{SP}(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_n(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (2.28)$$

E tendo em consideração a complementaridade entre  $F$  e  $R$ , facilmente se deduz a expressão de fiabilidade de um sistema paralelo composto por  $n$  componentes:

$$R_{SP}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (2.29)$$

Note-se ainda que a taxa de avarias do sistema paralelo não é constante, embora as taxas de avarias dos seus componentes o possam ser. Desta forma, o MTBF não poderá ser determinado como o inverso da taxa de avarias do sistema (que não é constante!).

---

<sup>5</sup> Por exemplo: Para um número total de componentes redundantes superior a dois, o resultado já seria uma expressão relativamente complexa.



Por exemplo, no caso particular do MTBF de um sistema paralelo activo, em que todas as suas  $n$  unidades tenham igual taxa de avarias (i.e.:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$ ), o cálculo é feito através da seguinte equação:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{2\lambda_1} + \dots + \frac{1}{n.\lambda_1} \quad (2.30)$$

### 2.6.3. Sistema Combinado

Dado que os componentes de um sistema são destinados a cada um deles desempenhar uma determinada função específica, é natural que os sistemas tendam a ser, primordialmente sistemas série. Dada, no entanto a propensão do sistema série para a baixa fiabilidade, leva a que os componentes de mais baixa fiabilidade sejam acompanhados por elementos redundantes, dando assim origem a células de subsistemas paralelo intercaladas na série geral dos componentes do sistema, são os designados sistemas combinados.

O sistema série de paralelos consiste numa série de  $n$  paralelos, cada um com  $m$  componentes paralelo iguais, ou seja, de igual fiabilidade  $R_1$ , terá uma fiabilidade dada pela seguinte expressão:

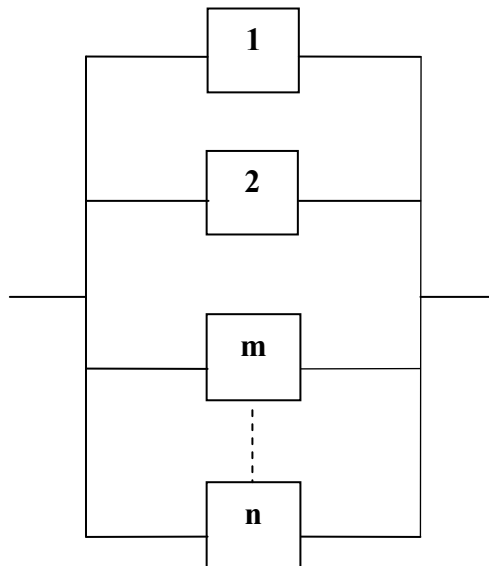
$$R_{SC} \equiv R_{SSP} = \left[1 - (1 - R_1)^m\right]^n \quad (2.31)$$

Se, no entanto, uma dada série de componentes fosse toda ela protegida por iguais séries redundantes com a primeira, teríamos um sistema paralelo de séries, representando um paralelo de  $m$  séries, cada uma com  $n$  componentes série, e todos de igual fiabilidade  $R_1$ , viria então para fiabilidade do sistema a expressão:

$$R_{SC} \equiv R_{SPS} = 1 - (1 - R_1^n)^m \quad (2.32)$$

#### 2.6.4. Sistema Paralelo Restrito ou Sistema “ $m$ em $n$ ” (“ $m$ -out-of- $n$ ”)

Neste caso o sistema é composto por  $n$  componentes activos, e para que o sistema cumpra a sua missão com sucesso, é requerido que no mínimo  $m$  componentes operem normalmente.



**Figura 2.12: Diagrama de Blocos de um Sistema “ $m$  em  $n$ ” componentes.**

Os sistemas série e paralelo podem ser considerados casos particulares do sistema “ $m$  em  $n$ ”.

Considerando os componentes iguais e independentes, e aplicando uma distribuição binomial, ter-se-á como resultado a seguinte expressão:

$$R_{m/n} = \sum_{j=m}^n \binom{n}{j} R^j (1-R)^{n-j} \quad (2.33)$$

Onde:

$$\binom{n}{j} = \frac{n!}{(n-j)! \cdot j!} \quad (2.34)$$

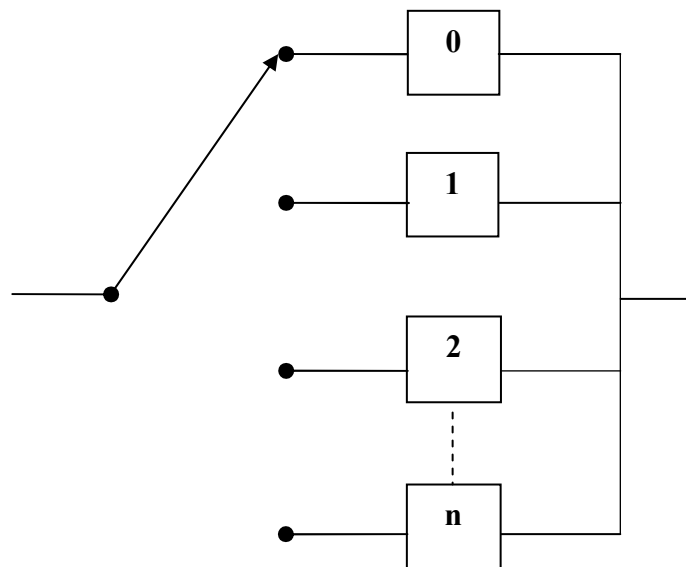
$R$  – fiabilidade do componente;

$R_{m/n}$  – fiabilidade do sistema “ $m$  em  $n$ ”.

Outra forma de cálculo de sistemas “ $m$ ” em “ $n$ ” consiste na análise de estados de sucesso do sistema.

### 2.6.5. Sistema Standby

A função do sistema é assegurada por apenas uma unidade do sistema, permanecendo  $n$  unidades em modo de standby. Nestas circunstâncias, o sistema é composto por um total de  $n+1$  unidades, do qual faz parte um componente dito de sensor comutador cuja função imediata será detectar a avaria do componente activo e comutar para um outro que se encontre em standby. Na Figura 2.13 está representado o diagrama de blocos do referido sistema.



**Figura 2.13: Diagrama de Blocos de um Sistema Standby, com um componente operativo e  $n$  componentes em standby.**

Por análise do diagrama da figura teremos:



$$R_{SB}(t) = \sum_{j=0}^n \frac{\left[ \int_0^t \lambda(t) \cdot dt \right]^j \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt}}{j!} \quad (2.35)$$

Onde:

$R_{SB}(t)$  – fiabilidade do sistema standby em  $t$ ;

$\lambda(t)$  – taxa de avarias de cada unidade.

Considerando as taxas de avarias constantes (i.e.,  $\lambda(t)=\lambda$ ), a expressão (2.35) tomará a seguinte forma:

$$R_{SB}(t) = \sum_{j=0}^n (\lambda \cdot t)^j \cdot e^{-\lambda \cdot t} / j! \quad (2.36)$$

### 2.6.6. Sistema Complexo

A maior parte dos sistemas reais não pode ser representada por meio das configurações apresentadas anteriormente, assumindo configurações mais complexas, constituindo outro tipo de sistemas, os denominados sistemas complexos. Os sistemas complexos não podem ser resolvidos por aplicação directa dos teoremas de cálculo de probabilidades, pelo que necessitam de métodos mais avançados para a dedução das equações analíticas de análise e cálculo da fiabilidade.

Existem os seguintes métodos para se realizar o cálculo da fiabilidade de sistemas complexos:

- Método da Decomposição (“*Decomposition Method*”);
- Método do Espaço dos Acontecimentos (“*Event Space Method*”);
- Método do Traçado dos Caminhos (“*Path-tracing Method*”).



No presente trabalho não são explicitados os métodos de cálculo da fiabilidade de sistemas complexos anteriormente referidos, ficando no entanto a sua referência.

## **2.7. Conclusões do presente Capítulo**

Neste capítulo foram apresentadas os fundamentos teóricos da Fiabilidade, que nos vão permitir realçar de que forma o método de análise de degradação em estudo pode trazer vantagens acrescidas para a obtenção de informação da fiabilidade de um bem.



---

## 3. Degradação

---

### 3.1. Conceito de Degradação

O conceito de degradação é importante para a análise do processo de degradação propriamente dito, por isso, é adoptada como definição de degradação de acordo com a Norma NP EN 13306 [1]:

*“Evolução irreversível de uma ou mais características de um bem relacionado com a passagem do tempo, a duração de utilização ou a uma causa externa<sup>6</sup>”.*

A avaria é frequentemente o resultado do efeito da degradação, e nesse sentido será útil relembrar também a definição de avaria [1]:

*“Cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida”.*

---

<sup>6</sup> A degradação é frequentemente referida como desgaste [1].



Após estes conceitos simples é indispensável começar por discutir a definição de avarias que podem ter origem no contexto da degradação, e nesse sentido é possível considerar dois tipos de modo de avarias:

- **Avaria severa** (“*hard failure*”), também denominada de avaria catastrófica – que implica a completa cessação de funções de um bem, este tipo de avaria não corresponde exactamente a um nível de degradação em particular;
- **Avaria suave** (“*soft failure*”), e que retrata a chamada avaria por degradação –que representa uma deterioração continua no tempo. Esta avaria tem por base a gradual degradação do desempenho do componente ou sistema, até um limite crítico predefinido (e.g.: o decréscimo de luz emitida por uma lâmpada fluorescente, que tem como limite mínimo admissível, 60% do valor inicial);

As avarias também podem ser classificadas quanto à rapidez, com que elas ocorrem [6]:

- **Avaria súbita** (“*sudden failure*”) – é uma avaria que não pode ser prevista por um exame prévio ou inspeção;
- **Avaria gradual** (“*gradual failure*”) – em contrapartida é uma avaria que pode ser prevista por exame ou inspeção. Ou seja, identifica claramente o processo desenvolvido por uma avaria por degradação.

Desta forma, é universalmente aceite a teoria de que um processo de degradação, é composto por dois tipos de avaria distintos.

Segundo alguns autores [7], paralelamente ao processo de degradação, uma unidade, está sujeita a outro modo de avaria independente deste, denominado de “*avaria súbita*”, ou ainda “*avaria traumática*”. A avaria súbita não pode ser prevista por um exame prévio ou monitorização. Deste modo, uma unidade sujeita a ambos os efeitos (avaria por degradação e avaria súbita), encontra-se submetida a riscos que competem (“*competing risk*”).



As causas de degradação de um sistema, podem ter origem diversificada, como sejam: a fadiga, o desgaste, falha de componentes não essenciais, choques aleatórios no sistema, entre outros.

### **3.2. Análise de Degradação**

A análise de dados de degradação tem aplicação em muitos campos, e tão diversificados como a electrónica, mecânica, meteorologia ou medicina. Por exemplo, e como curiosidade em estudos de medicina é sugerido que o sistema imunitário de uma pessoa infectada com o vírus HIV se degrada com o tempo [8]. Desta forma, os dados de degradação são uma fonte de informação de sobrevivência muito rica.

Os modelos para estimar a fiabilidade de um bem, com base em dados de degradação podem ser classificados segundo dois grupos:

- Os modelos baseados na física, ou seja, quando a lei de degradação é conhecida pode-se aplicar a física da falha para determinar toda a informação, e nomeadamente a vida útil restante. A aplicação de um modelo baseado na física é limitada aos bens, que exibam um fenómeno de degradação subjacente.
- Os modelos baseados na estatística, ou seja, quando a lei de degradação não é conhecida, e é possível monitorizar ao longo do tempo a medida de degradação (perda de eficiência, desgaste de um pneu, nível de vibração, variação de temperatura, etc.), consegue-se obter através de modelos estatísticos a informação pretendida.

Para alguns componentes, as medidas de degradação, registadas ao longo do tempo, contêm uma vasta informação sobre a fiabilidade do produto. Se a falha é definida em termos de um nível específico de degradação, é possível construir um modelo de degradação e estimar a distribuição do tempo até a falha a partir das medidas de degradação. Assim, de acordo com a distribuição pode-se prever o tempo de vida



restante, a falha e a distribuição do tempo de vida podem ser previstas mesmo que nenhuma unidade falhe.

A partir do desenvolvimento de modelos básicos de degradação, é possível partir para uma análise de fiabilidade mais detalhada, estimando-se o tempo até a falha a partir de medidas de degradação, tendo a vantagem de não exigir que o teste seja conduzido até à ocorrência de falha.

Matematicamente, podem-se extrapolar as medidas de degradação no tempo e estimar para quando se prevê a ocorrência da falha associada ao parâmetro em estudo.

A análise de degradação compreende a medição e extrapolação da degradação de um determinado parâmetro ou dos dados de desempenho e/ou qualidade que podem estar directamente relacionados com uma presumível falha do produto em questão.

Em alguns casos é possível medir directamente a degradação ao longo do tempo, como sejam: o desgaste de pastilhas de travão ou a propagação do tamanho de uma fenda. Noutros casos a medição directa do efeito da degradação não será possível, sem o recurso a técnicas invasivas ou destrutivas, o que afectaria o subsequente desempenho do produto. Neste caso, a degradação do produto pode ser estimada por meio da medição de parâmetros característicos de desempenho.

Quanto à forma de monitorização da degradação é possível considerar dois tipos fundamentais [9]:

- Degradação monitorizada *online* – é vigiada continuamente ao longo do tempo por um sensor, de que resulta uma manutenção condicionada eficaz pois o sensor detecta o estado eminente de uma falha. No entanto existem casos em que a monitorização *online* não é tecnicamente possível ou economicamente viável (e.g.: operações de pára-arranca indesejáveis, condições de segurança fragilizadas, etc.);



- Degradação monitorizada *offline* – é realizada uma monitorização periódica com base em inspecções. Os momentos de inspecção devem ser criteriosamente seleccionados com base no conhecimento da função que descreve a progressão da degradação ao longo do tempo ou de outra unidade determinante daquela (i.e.: número de cursos de um cilindro, número de ciclos ligar-desligar de uma bobina, número de quilómetros percorridos por uma viatura, etc.).

A determinação do valor indicativo de potencial avaria, ou porventura também denominado de limite de alarme, pode ser estabelecida por diversos factores, como sejam:

- Recomendações definidas pelo fabricante do equipamento;
- Normas nacionais e internacionais;
- Experiência operacional em equipamentos similares;
- Razões de segurança, que ponham em risco meio humanos ou materiais;
- Registo de dados prévios de avaria;
- Etc.

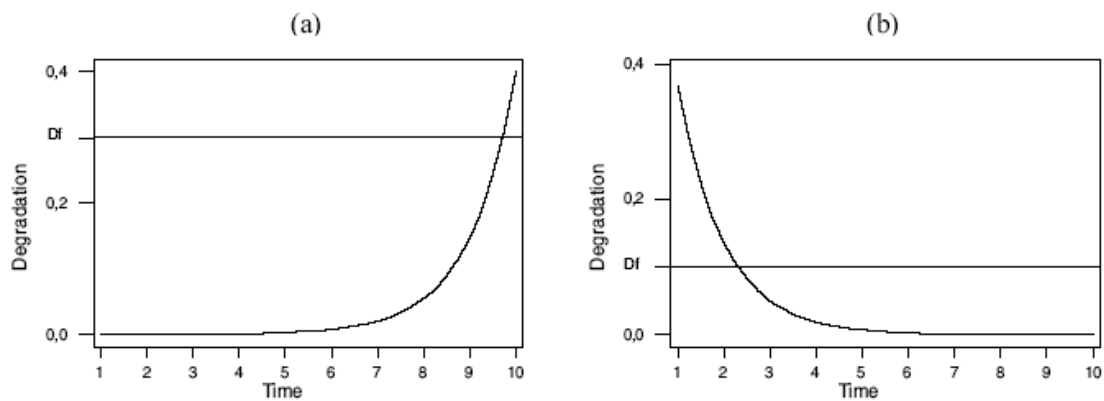
O comportamento ou degradação dessas unidades deve ser medido durante um determinado período, de uma forma contínua ou em intervalos predeterminados. Depois de registar toda essa informação, a próxima tarefa passa pela extrapolação dos valores obtidos, com o objectivo de estimar o tempo até à falha (“*time-to-failure, TTF*”).

A obtenção do TTF é de extraordinária importância para a Engenharia da Fiabilidade do produto, pois através dele é possível retirar outros valores estatísticos que permitirão caracterizar o mesmo, como sejam: a função densidade de probabilidade, a função de probabilidade de falha acumulada, a função de fiabilidade, a taxa de avarias, o MTBF, etc.

### 3.2.1. Análise de Curvas de Tendência

Um modelo de degradação pode ser representado graficamente por uma curva, ou uma família de curvas, que revela a evolução da degradação, ou queda de desempenho, de um determinado componente ou produto submetido a uma determinada carga de trabalho ao longo do tempo. Para um produto específico, usualmente existem propriedades padrão de desempenho e métodos para as medir. Certas propriedades degradam-se com a idade do produto, e esta degradação pode ou não ser acelerada na presença de altos níveis de “*stress*” (esforços, cargas, etc.).

As medidas de degradação podem ser uma função crescente ou decrescente no tempo, dependendo das características a serem estudadas (e.g.: se estivermos a estudar a propagação de uma fissura num componente metálico a função é crescente, enquanto se estivermos a observar um desgaste de pastilhas de travão ou medida da espessura de tubagens devido a desgaste obviamente estaremos perante uma função decrescente). A Figura 3.1 ilustra ambas as formas.



**Figura 3.1: Caminho de degradação em função do tempo: (a) crescente; (b) decrescente [10].**

Segundo R.Jiang e A.K.S. Jardine [11], existem duas categorias básicas de modelos de degradação difundidas em literatura: *discreta* e *contínua*.

Um género típico de modelos de degradação contínua são os modelos de caminho de degradação geral, onde a degradação é expressa como uma função de tempo.

Nesta secção é apresentada uma generalização do modelo de **caminho de degradação geral** (“*general degradation path*”).

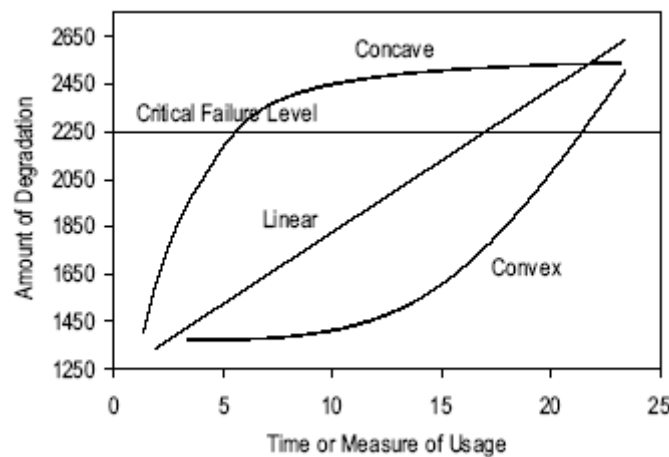
Assumindo que para cada unidade, numa amostra aleatória de  $n$  unidades, a medida de degradação é representada por,  $y$ , e registada em tempos pré-especificados  $t_1, t_2, \dots, t_S$ ; até cruzar um nível crítico especificado, ou até ao tempo  $t_S$ , conforme o que ocorrer primeiro. de  $i$ th unidade no tempo  $t_j$  é dada por:

$$y_{ij} = f(t_{ij}; \beta, \theta) + \varepsilon_{ij} \quad (3.1)$$

Onde:

- $\varepsilon_{ij}$  – erro de medição, que se assume ter uma distribuição normal com média zero e variância constante, isto é  $\varepsilon_{ij} \sim N(0; \sigma_\varepsilon^2)$ ;
- $\beta$  - parâmetros de efeitos fixos, que são comuns a todas as unidades,
- $\theta$  - parâmetros de efeitos aleatórios, que representam as características individuais de cada unidade ( i.e.: variações nas propriedades da matéria-prima, no processo de produção, nas dimensões do componente, etc.).

Segundo o autor [12], considera-se três formas gerais de curvas de degradação em unidades de degradação e tempo arbitrárias (linear, convexa e concava), ilustradas na Figura 3.2:



**Figura 3.2: Formas possíveis de curvas de degradação [12].**



Em determinados sistemas pode existir mais de uma variável de degradação ou mais do que um processo de degradação em análise.

Acrescente-se ainda que a incerteza nos resultados é tanto maior, quanto menor o número de unidades, ou registos considerados para teste.

A natureza dos parâmetros a medir deve ser a mais adequada ao tipo de falha expectável para o equipamento que se pretende monitorizar. Do ponto de vista técnico existem uma grande variedade de grandezas a medir, das quais podemos destacar: a medição de temperatura, pressão, posição, velocidade, aceleração, vibração, tensão, etc.

Um processo de degradação normalmente está sujeito a uma determinada variabilidade, de unidade para unidade, dependendo dessa variação dos seguintes factores fundamentais:

- Condições de operação;
- Variabilidade das condições do meio onde operam;
- Variabilidade na fabricação;
- Variabilidade nas propriedades do material.

A combinação destes factores origina a variabilidade nas curvas de tendência de degradação e nos tempos de falha de cada unidade.

Dado que um equipamento muitas vezes é constituído por múltiplos componentes ou subsistemas, a capacidade de monitorizar ou prever a degradação de um componente pode não ser suficiente para prever a globalidade das avarias do equipamento. Por exemplo, a degradação de um componente pode iniciar ou acelerar, a avaria de outro componente e vice-versa. Em casos críticos, este fenómeno pode dar origem a consequências catastróficas. Estamos perante os chamados *efeitos de interacção de avarias*.

De acordo com Soro, I. et al. [13], os níveis de degradação, não se resumem simplesmente a dois estados (i.e.: “perfeito funcionamento” e “falha completa”),



significando isto que, a avaliação da degradação deve considerar um sistema multi-estados (*Multi-state system, MSS*), compreendido entre os dois estados acima referidos.

### **3.2.2. Metodologia aplicada na Análise de Degradação**

Sobral, J. e Ferreira, L.A. [14], propõem uma metodologia fundamentada em nove passos, como abaixo se descreve:

- Seleccção do equipamento crítico:

A selecção do equipamento a monitorizar, deve ter em conta, a sua importância no processo ou na segurança do mesmo, com o objectivo de evitar o recurso à manutenção correctiva.

- Seleccção do modo de falha:

Este é encarado como o passo mais importante desta metodologia. Para os casos, onde à priori, o modo de falha é imprevisível no início da análise, a análise de modos e efeitos de falha, AMEF, (*Failure Modes and Effect Analysis, FMEA*), é considerado um precioso e simples método, que normalmente leva a um bom resultado.

- Seleccção do parâmetro crítico de degradação:

Tendo o modo de falha seleccionado, o passo seguinte passa por definir o parâmetro que se encontra na origem do referido modo de falha.

- Definição do valor limite do parâmetro crítico de degradação:

Neste passo é necessário definir um valor limite ou valor de alarme, a partir do qual o componente ou sistema, atinge o estado de avaria potencial.



- Seleção da melhor técnica de monitorização

Entre as técnicas usadas em manutenção preditiva ou condicionada, incluem-se: análise de vibrações, termografia, análise de óleos de lubrificação, análise de partículas, ferrografia, inspeção por ultra-sons, inspeção radiográfica, etc. O critério de selecção da técnica apropriada a utilizar, deverá ser, seleccionar aquela que melhores resultados produz face ao parâmetro crítico a estudar.

- Colecção de dados (colecta resultante da monitorização dos parâmetros medidos em intervalos pré-definidos ou em contínuo)

A compilação dos dados é de extrema importância, já que eles são a base para a extrapolação, que levarão à estimativa do tempo até à falha. A recolha destes dados poderá ser realizada de uma forma periódica ou contínua, e de forma manual ou com recurso a sensores e com um sistema de gestão centralizado.

- Aplicação do método de extrapolação específico

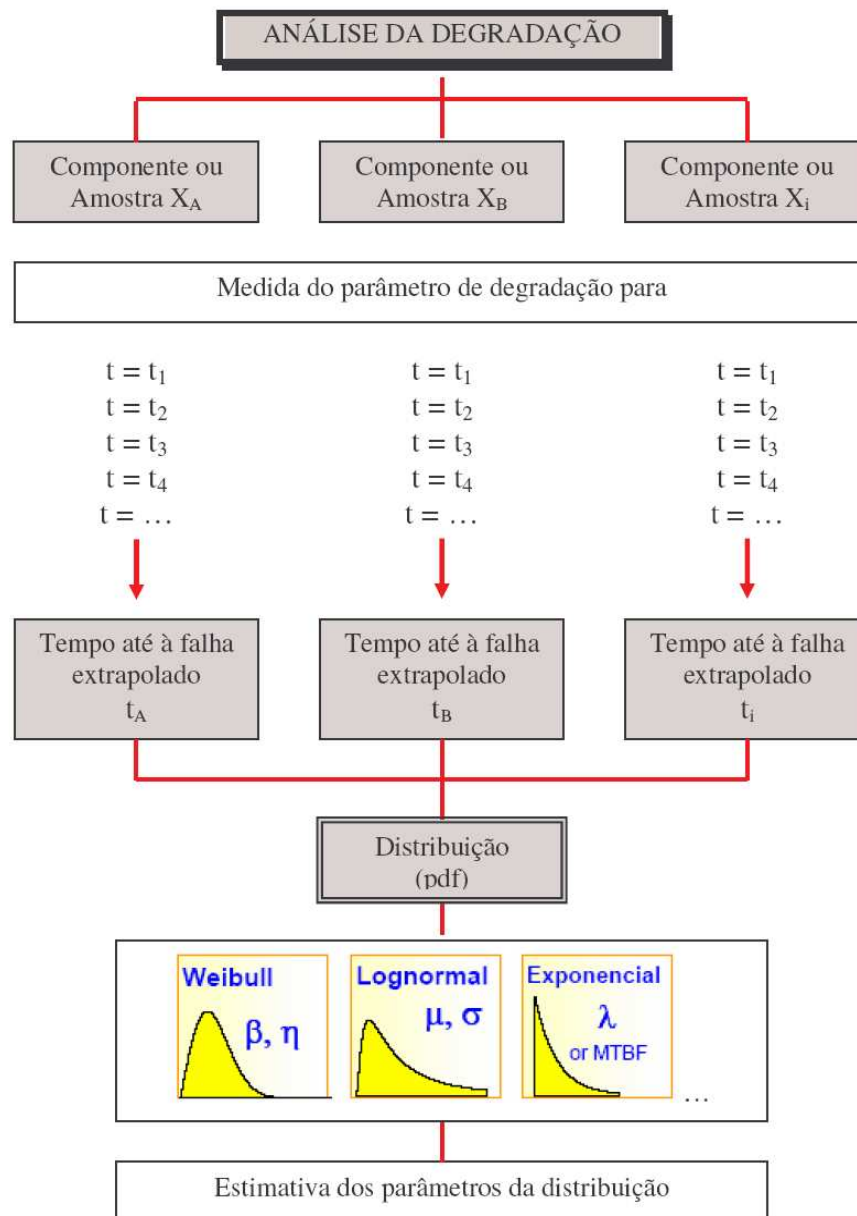
Após analisados os valores de degradação recolhidos, segue-se a fase de tratamento desses dados. Para isso é seleccionado um método de extrapolação que melhor se ajuste aos dados disponíveis (curvas de tendência).

- Estimar o tempo até à falha:

Com base no modelo de extrapolação aplicado, e tratando-se da análise de um simples equipamento, o cálculo do tempo até à falha é imediato. Se a análise contemplar um grupo de equipamentos similares, então serão estimados vários tempos até à falha, que requer o uso de uma ferramenta convencional (baseada em tempos até à falha) para efectuar a análise de dados de vida e para saber qual é a melhor distribuição estatística que se ajuste a esses tempos até à falha.

- Planear as acções da manutenção:

O último passo desta metodologia é estabelecer as acções de manutenção apropriadas. Para que isso seja possível, deve ser acordado com a função de produção, qual a melhor altura para executar essas acções e prever os recursos necessários para a sua efectivação. Todos os materiais, ferramentas, pessoas e logística de suporte devem ser bem planeados. A figura abaixo ilustra esta metodologia, supondo que são analisados equipamentos idênticos ao mesmo tempo.



**Figura 3.3: Metodologia de Análise de Degradação [15].**



### 3.2.3 Ensaios de Vida Acelerados de Degradação

A rápida evolução tecnológica das últimas décadas, tem contribuído decisivamente para aumentar a complexidade dos produtos. Isto está em linha com a moderna filosofia de qualidade da produção de bens de alta fiabilidade. A maioria dos produtos modernos é projectada para operar sem falhas durante anos, décadas ou até mais tempo. Assim, poucas unidades irão falhar ou sofrer uma degradação apreciável em teste, em condições de uso normal.

Os prazos para desenvolvimento dos produtos são cada vez menores e, por conseguinte, os ensaios envolvendo componentes são realizados em prazos curtos.

Uma das ferramentas no diagnóstico do nível de fiabilidade de um produto é os ensaios acelerados de degradação. O objectivo do uso de ensaios acelerados, é adquirir informação de fiabilidade mais rapidamente.

A análise de degradação de determinado componente, pode ser assim obtida em condições normais de serviço ou através de ensaios acelerados, sob condições de carga mais severas.

Em termos de degradação são consideradas essencialmente duas classes de ensaios acelerados [16]:

- *Ensaios acelerados de degradação com medições repetidas* – Consiste na medição da degradação, numa amostra de  $n$  unidades em diferentes pontos no tempo. Em geral por cada unidade é efectuado o registo de várias medidas de degradação.
- *Ensaios acelerados de degradação destrutivos* – a base destes ensaios é semelhante aos ensaios com medições repetidas, exceptuando o facto destas



medições serem destrutivas. Ou seja, por cada unidade de teste, só é possível obter uma observação válida para análise.

A ideia geral é testar em altos níveis de “*stress*”, variáveis aceleradas, com a finalidade de acelerar o processo de avaria, e extrapolar para baixos níveis (correspondentes aos reais) essas variáveis aceleradas. A extrapolação deve assentar num modelo baseado no processo físico/químico teórico que possa levar à avaria, ou eventualmente na combinação com um modelo empírico que se ajuste convenientemente, pela experiência prévia em ensaios similares.

É importante realçar que a técnica de ensaios acelerados é mais uma ferramenta de alto potencial dentro da Engenharia da Fiabilidade, que torna mais ágil o desenvolvimento de novos produtos.

No entanto, este trabalho não contempla a análise de degradação através de ensaios acelerados, mas tendo em conta o processo de degradação em condições normais de operação.

Além de que, a técnica de ensaios acelerados nem sempre é viável, dado que alguns produtos não podem ser acelerados por já serem utilizados em condições ou frequência de uso extremas, e outros têm o seu modo de falha modificado, invalidando a sua análise.

### **3.2.4. Análise de Degradação – Vantagens versus Limitações**

O uso da análise de degradação tem um grande potencial para a melhoria da análise de fiabilidade, por isso é fundamental citar as vantagens e limitações que poderão estar associados a este método.

Como algumas das vantagens do uso da análise de degradação, é possível destacar [12]:



- Os dados de degradação podem fornecer consideravelmente mais informação de fiabilidade, do que a que se obteria por meio dos tradicionais dados censurados de tempo de falha, particularmente em aplicações em que poucas ou nenhuma falhas são expectáveis;
- Os ensaios acelerados de degradação são os mais utilizados, no sentido de obter a informação sobre testes de fiabilidade mais rapidamente;
- A degradação é uma reacção natural em determinados testes. E os dados de degradação podem trazer uma melhor informação do processo de degradação, que por sua vez ajuda a encontrar uma apropriada relação funcional.
- Os dados de degradação podem ser analisados antecipadamente, antes que a avaria ocorra na realidade, e podem ser inestimáveis em estudos de produtos altamente fiáveis, que apresentam poucas ou nenhuma avaria no decorrer dos tradicionais ensaios de vida;
- Os dados de degradação podem dar mais precisão da vida estimada, do que testes acelerados de vida com poucas ou nenhuma avarias;
- É mais credível por extrapolação, a modelação está mais próxima do fenómeno físico da falha, comparado com os dados de tempo de falha.

Apesar das referidas vantagens, também é possível referir algumas das limitações na análise de degradação:

- A modelação do desempenho de um componente ou sistema pode ser útil, mas essa modelação pode ser mais complicada em virtude do rendimento poder ser afectado, inconscientemente, por mais de uma causa de avaria, física ou química do processo;
- Os dados de degradação podem ser difíceis, ou mesmo impossíveis de obter;



- A obtenção dos dados de degradação pode originar um efeito (ou efeitos), na futura degradação do produto;
- Erros substanciais de medida tornam a informação dos dados de degradação menos precisa;
- O nível de degradação pode não estar directamente correlacionado com a avaria;
- A análise pode ser complicada e requerer métodos estatísticos que ainda não estejam vastamente disponíveis.

### 3.3. Modelos Matemáticos de Previsão

O recurso a modelos matemáticos tem por objectivo estimar a evolução da degradação de um componente. A análise de dados experimentais gera um modelo baseado em funções matemáticas. O modelo deve apresentar uma aderência satisfatória aos dados provenientes dos ensaios e por consequência gerar uma estimativa de vida para um determinado componente.

A modelação da degradação passa pela utilização de um modelo matemático, que possa traduzir uma imagem fidedigna do comportamento de um componente ou sistema nas condições normais de utilização.

Neste âmbito, convém relembrar o conceito de **previsão**:

*“É a estimativa do valor de uma variável (ou conjunto de variáveis) num ponto futuro”.*

A escolha do modelo de degradação espelha o fenómeno físico de compreensão da avaria, de como a degradação do desempenho progride sobre o tempo.

É com base nestes pressupostos que a seguir será feita, a apresentação de modelos matemáticos mais comumente usados em análise de degradação. Onde  $y$  representa o valor da degradação,  $t$  representa o tempo e  $(a, b, c)$  os parâmetros dos modelos a serem determinados.

### Modelo Linear

É usual adoptar um modelo linear para estimar a tendência, recorrendo à técnica de regressão linear para estimar os parâmetros  $a$  e  $b$ .

$$y = a.t + b \quad (3.2)$$

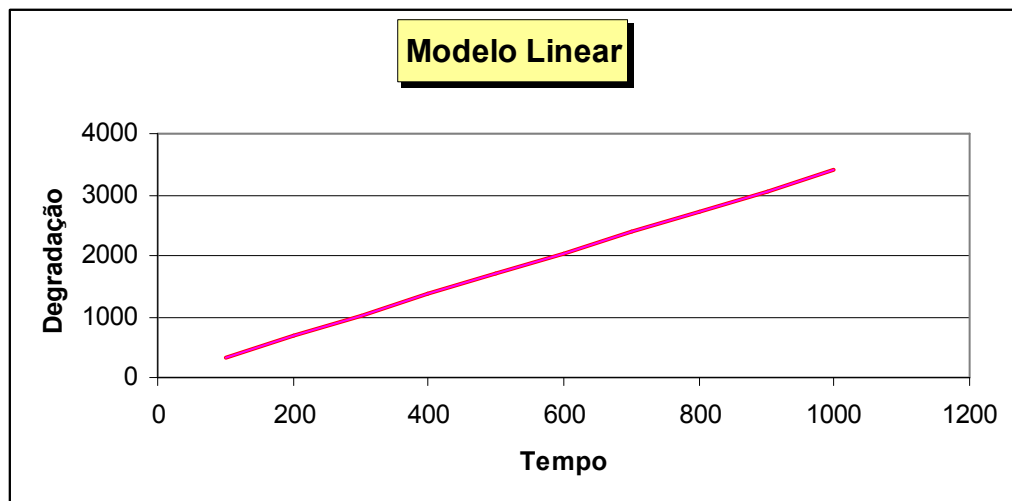


Figura 3.4: Representação da Curva do Modelo Linear.

### Modelo Exponencial

O Modelo Exponencial pode ser utilizado para modelação de dados de análise de fiabilidade, principalmente para dados com funções de risco constantes, sendo essa a sua principal característica em relação aos outros modelos. O Modelo Exponencial também pode ser utilizado com sucesso para ajuste de dados censurados, os quais são comuns em análise de fiabilidade.

$$y = b \cdot e^{a \cdot t} \quad (3.3)$$

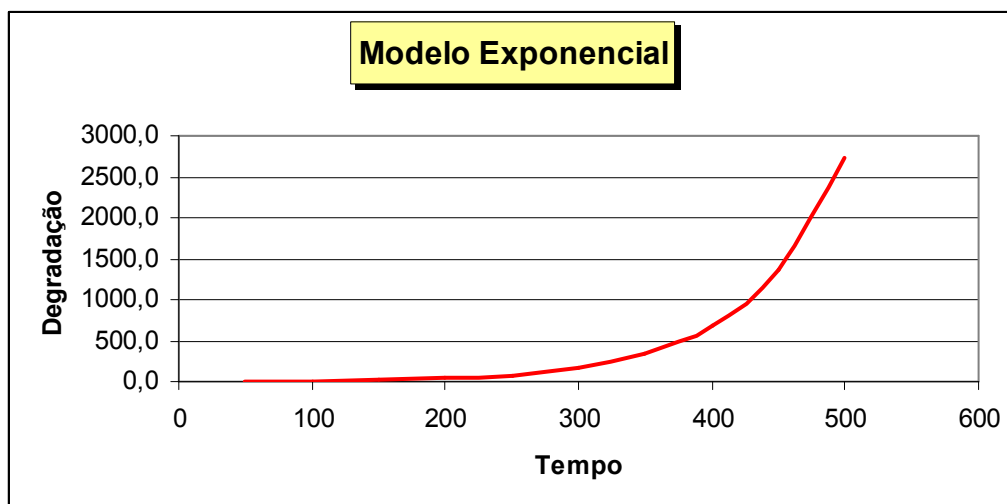


Figura 3.5: Representação da Curva do Modelo Exponencial.

### Modelo Potência

O modelo de potência, também muitas vezes reconhecido por *lei da potência*, caracteriza o comportamento de um vasto número de fenómenos naturais, nomeadamente em mecanismos de degradação. O modelo de potência é frequentemente aplicado em processos estocásticos específicos, e a sua expressão é a seguinte:

$$y = b.t^a \quad (3.4)$$

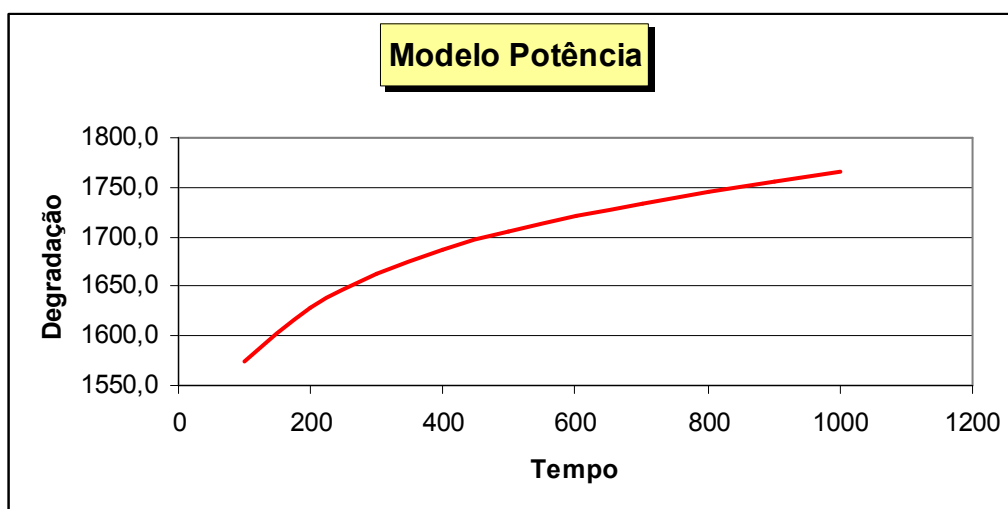


Figura 3.6: Representação da Curva do Modelo Potência.

## Modelo Logaritmico

O modelo logaritmico é definido pela expressão:

$$y = a \cdot \ln(t) + b \quad (3.5)$$

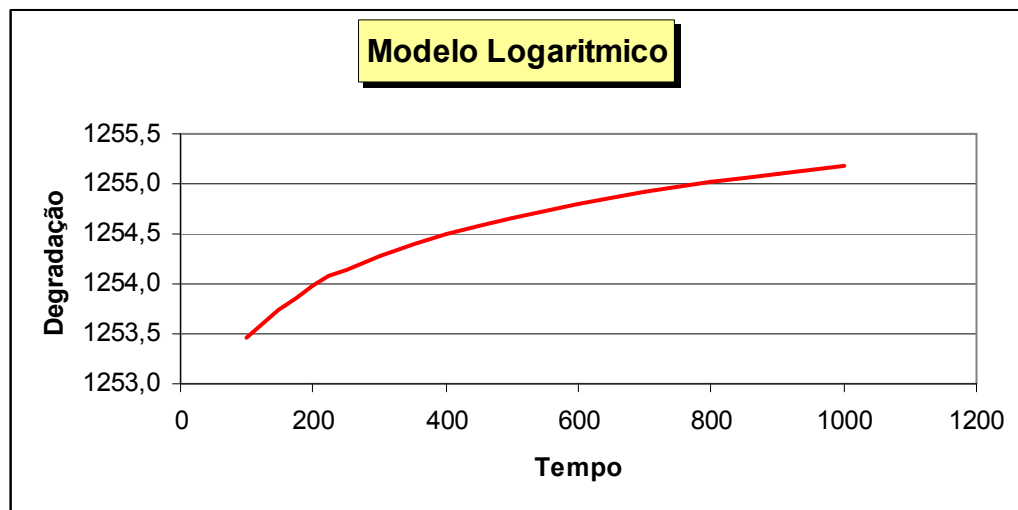


Figura 3.7: Representação da Curva do Modelo Logaritmico.

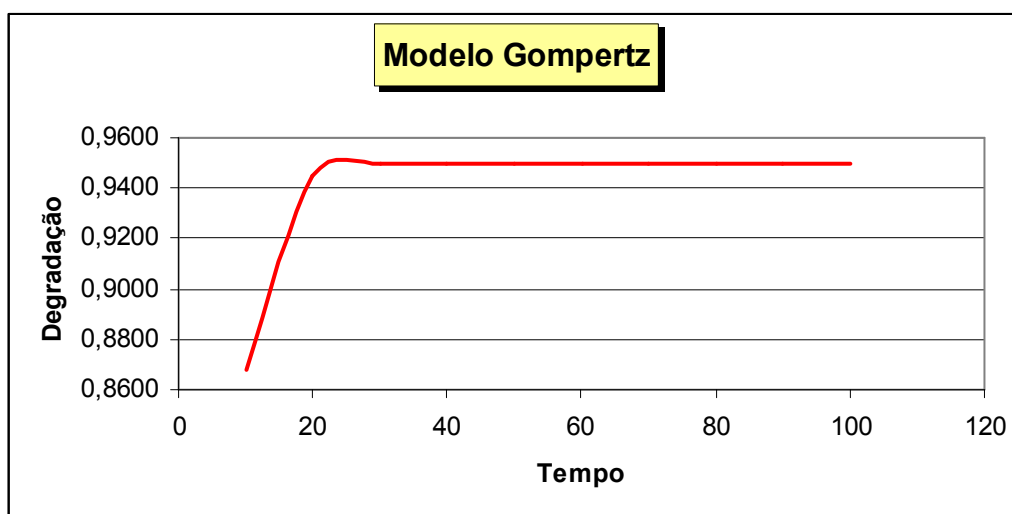
## Modelo Gompertz

O modelo de Gompertz é frequentemente aplicável para análise de dados de fiabilidade. É mais aplicado quando os dados recolhidos, estão distribuídos graficamente sob a forma de uma curva suave, sem grandes variações. O modelo de Gompertz é matematicamente dado pela seguinte expressão:

$$y = a \cdot b^{(c^t)} \quad (3.6)$$

Como se pode verificar pela equação matemática, o Modelo de Gompertz é um modelo de três parâmetros, representado pelos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

- $a$  – Limite superior para a fiabilidade quando tende assintoticamente para o valor,  $t \rightarrow \infty$ , ou então, a fiabilidade máxima desejada;
- $b$  – Parâmetro de referência;
- $c$  – Índice padrão de crescimento. Pequenos valores ( $0 < c < 0,50$ ) indicam um rápido crescimento e grandes valores ( $0,50 < c < 1$ ) indicam um lento crescimento. Para o valor de  $c = 1$ , não existe nenhum crescimento;
- $a.b$  – Fiabilidade inicial, ou seja  $t = 0$ .



**Figura 3.8: Representação da Curva do Modelo de Gompertz.**

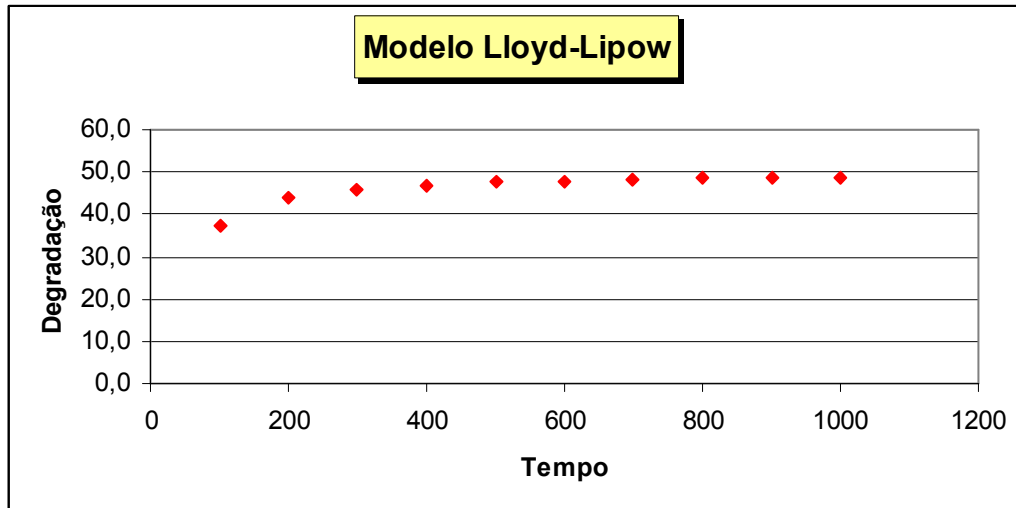
A solução da equação tripamétrica de Gompertz em função dos valores  $[R_i, t_i]$ , é realizada pela melhor aproximação à sua curva de variação por métodos numéricos.

O modelo de Gompertz também é aplicável para tratamento de dados discretos (sucesso/falha).

### **Modelo Lloyd-Lipow**

O modelo de Lloyd-Lipow baseia-se num programa de testes composto por “ $N$ ” etapas, cada uma delas constituída por um dado número de ensaios, com vista a melhorar a etapa anterior, que são registadas como sucesso (S) ou falha (F). O modelo de Lloyd-Lipow é um modelo discreto assente na seguinte expressão:

$$y = a - \frac{b}{t} \quad (3.7)$$



**Figura 3.9: Representação do Modelo de Lloyd-Lipow.**

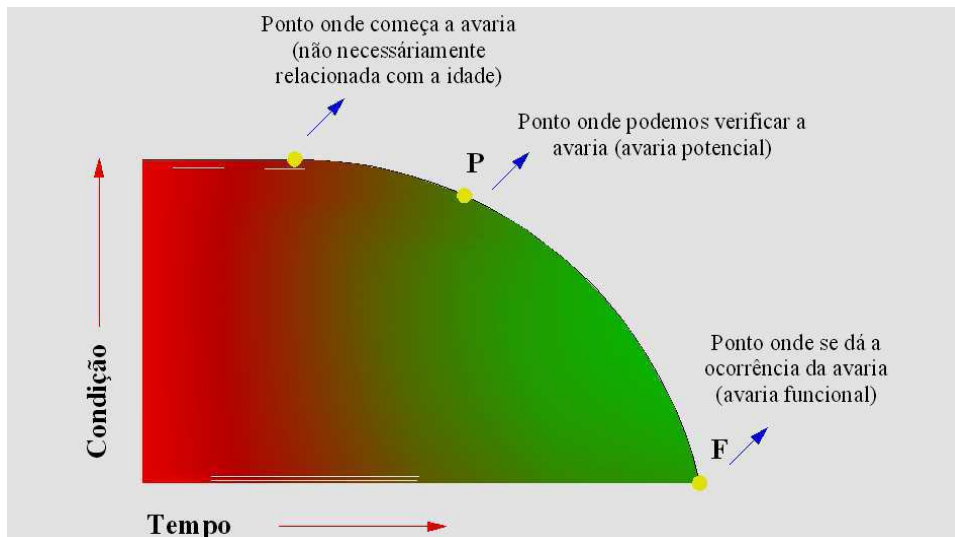
Em suma, e qualquer que seja o contexto, os modelos matemáticos poderão desempenhar papéis relevantes na tomada de decisões, introduzindo elementos de objectividade, abrangência sistémica e fundamento científico, contribuindo para aumentar a eficácia e eficiência dos processos decisórios e para melhorar a qualidade e fundamento das soluções adoptadas.

### 3.4. Intervalo P-F

Muitos modos de falha apresentam sinais evidentes quando estão prestes a ocorrer. Alguns exemplos de sinais de falha que podem ser detectadas são: vibrações excessivas, fendas, gotas de óleo, ruído, viscosidade, cor, etc.

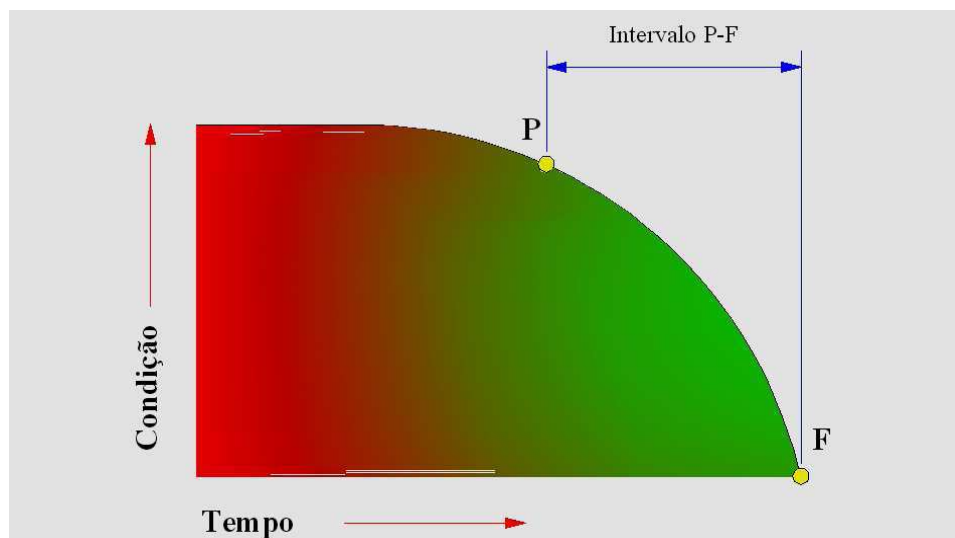
Com base nos dados de degradação recolhidos é possível ilustrar o comportamento de um dado equipamento, objectivando a sua aproximação à falha, na denominada curva

P-F. A curva demonstra a evolução do estado de falha, desde o seu início até ao ponto em que pode ser detectada, a chamada **falha potencial (P)**. A partir deste ponto a falha estará sujeita a um processo crescente de degradação, que caso não seja detectada e acompanhada, a leva até à **falha funcional** ou efectiva (**F**). A Figura 3.10 mostra o processo de degradação, representado por uma curva P-F.



**Figura 3.10: Curva P-F típica [15].**

O período de tempo que decorre entre o ponto onde a falha potencial ocorre, e o ponto onde se chega à falha funcional, é conhecido como o **intervalo P-F**, tal como ilustrado na Figura 3.11.



**Figura 3.11: Intervalo P-F [15].**



A detectabilidade de falhas expressas nos sobejamente conhecidos intervalos P-F são estimadas com base no registo de dados de degradação. O intervalo P-F pode ser medido em qualquer unidade que esteja relacionada com o tipo de factor associado à progressão da falha (tempo de uso, ciclos, quilómetros, etc.).

Eis alguns exemplos de falhas potenciais: vibração de um rolamento, fendas de uma parede, presença de partículas metálicas no óleo de lubrificação de uma caixa redutora, fuga de fluido por uma junta. Todas elas podem não se transformar em falhas funcionais se detectadas a tempo de tomarmos providências.

O intervalo P-F é um intervalo de tempo durante o qual se pode estabelecer a melhor estratégia para as acções a implementar, ao nível da Gestão da Manutenção. Pode ainda acrescentar-se que o intervalo P-F pode ser estimado, usando o julgamento e a experiência de quem projectou, fabricou e/ou operou o equipamento. De notar que o intervalo P-F deve ser estimado contemplando um único modo de falha.

Na prática, intervalos de inspecção iguais a metade do intervalo P-F são considerados adequados [17]. No entanto, é preciso ter em conta a severidade da falha, que também pesa na decisão sobre a frequência do intervalo de inspecção.

Existem já no mercado soluções informáticas que permitem fazer a optimização do intervalo de inspecção em função das condições do componente e/ou do sistema, mediante a análise de diferentes critérios, como sejam, disponibilidade, lucro, etc.

De acordo com Jiang, R. [18], podem definir-se três estados diferentes de degradação:

- *Normal* – quando a degradação é inferior ao limite de alarme ou de falha potencial;
- *Falha funcional* – quando a degradação é superior ao limite de falha funcional;
- *Falha potencial* – quando a degradação é superior ao limite de alarme e inferior ao limite de falha funcional.

Outros autores [19] consideram que um bem opera em duas zonas distintas, a zona normal, da instalação até à avaria potencial (P), e a zona anormal, da avaria potencial (P) até à avaria funcional (F). Na zona normal, um bem funciona livre de falhas. Na zona anormal, o bem opera com falhas e está sujeito a um processo de deterioração.

A Figura 3.12 ilustra numa forma genérica como os dados medidos são indicadores da evolução desse processo de deterioração. Estas medidas apresentam um comportamento estável na zona normal, até ao ponto de falha potencial (P), enquanto se regista uma clara tendência de aumento a partir do ponto de falha potencial até ao ponto de falha funcional.

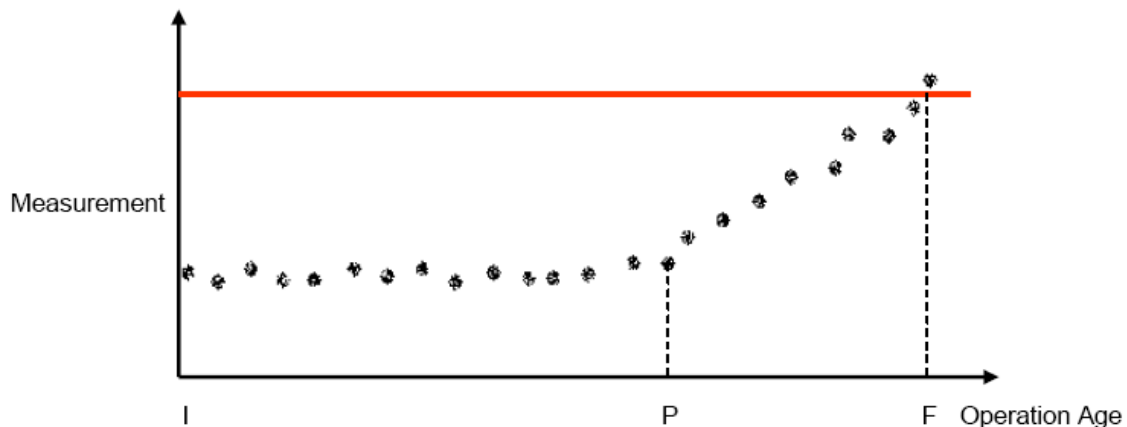


Figura 3.12: Evolução das medições em operação [19].

### 3.5. Análise de Degradação no Apoio à Estratégia de Manutenção

Dentro das organizações a função manutenção deve ser considerada um ponto crítico para o aumento da competitividade contribuindo para fortalecer a imagem da organização perante os seus clientes. De acordo com Zhao, Z. et al. [20], o custo anual da manutenção situa-se acima dos 15% para as empresas de manufatura, 20% a 30% para indústria química e 40% para as indústrias do ferro e do aço.

Durante muito tempo a manutenção foi considerada um “mal necessário”, mas com a competição entre as organizações, com diferentes níveis socio-económicos e culturais,



chegou-se a conclusão que manter os equipamentos de forma adequada é um dos pilares para a melhoria da qualidade e economia no processo produtivo de bens e serviços. Dentro da organização, a garantia da disponibilidade e fiabilidade dos equipamentos conseguida com uma função manutenção eficaz e eficiente irá melhorar a competitividade.

O papel da gestão da manutenção deve ser objectivo, e propiciar as correcções necessárias a favor da *melhoria continua*. A visão clássica da manutenção é a reparação de itens danificados. Obviamente, o conceito actual de manutenção permite uma visão mais ampla, porque inclui agora uma estratégia e uma abordagem proactiva, que vai desde os serviços rotineiros e inspecções periódicas até à actuação preventiva e monitorização das condições.

Convém aqui introduzir o conceito de Estratégia de Manutenção, de acordo com a Norma NP EN 13306 [1]:

*“Método de gestão utilizado para atingir os objectivos de manutenção.”*

É unanimemente aceite que no quadro principal das estratégias de manutenção típicas, se consideram: a manutenção correctiva, a manutenção preventiva sistemática, a manutenção preventiva condicionada (preditiva). Não há uma fórmula perfeita que possa eliminar os problemas enfrentados na manutenção, ou seja, nenhuma estratégia ou metodologia de gestão da manutenção é intrinsecamente melhor que as outras. Cada uma possui o seu lugar, sendo que o verdadeiro desafio consiste em encontrar qual a mais indicada, a cada caso específico. A melhor estratégia, ou melhor metodologia irá variar de acordo com as necessidades das empresas, grau de criticidade dos seus processos e custos de produção, ou de perda da produção.

Uma manutenção otimizada deve estar voltada para os resultados da organização. É preciso deixar de ser apenas eficaz para se tornar eficiente, ou seja, não basta apenas reparar o equipamento ou instalação tão rápido quanto possível, é preciso principalmente manter a função do equipamento disponível para a operação reduzindo a probabilidade de uma paragem não planeada.

---



A análise de degradação insere-se numa perspectiva estratégica de manutenção condicionada, com grande enfoque aplicada à manutenção preditiva. Por isso é conveniente deixar presente ambos os conceitos, respectivamente para Manutenção Condicionada e Manutenção Preditiva [1]:

*“Manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros<sup>7</sup> significativos desse funcionamento, integrando as acções daí decorrentes”.*

*“Manutenção condicionada efectuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem”.*

A análise de degradação tem um papel fundamental de apoio à tomada de decisão na perspectiva da Manutenção Condicionada.

Sempre que seja possível prever a ocorrência de uma avaria pela deterioração do valor de algum parâmetro indicativo da condição de uma máquina ou sistema (*“Condition-based maintenance, CBM”*), e se isso puder ser feito com tempo suficiente para se poder planear uma intervenção correctiva, então estamos perante uma situação em que a **manutenção preditiva** ou **condicionada** é aplicável.

A manutenção condicionada difere da manutenção sistemática por se ter passado da execução de uma manutenção de forma sistemática para a execução de um controlo de condição de forma sistemático.

A manutenção preventiva sistemática faz-se de forma periódica, e é independentemente da condição do material, apresentando os seguintes inconvenientes em relação à manutenção preventiva condicionada:

---

<sup>7</sup> A vigilância do funcionamento e dos parâmetros pode ser executada segundo um calendário, a pedido ou de modo contínuo.



- Ao efectuar uma intervenção nos equipamentos há sempre o risco de introduzir avarias, por acidente ou negligência;
- Ao substituir peças antigas por novas há sempre o risco de que estas apresentem defeitos de origem susceptíveis de afectar a operação;
- Ao substituir as peças antes do termo da sua vida útil perde-se tempo de vida que representa um desperdício económico e material.

O sucesso de um programa de manutenção preditiva passa pela selecção de um conjunto de técnicas que, complementando-se, retrate o mais fielmente possível a condição dos equipamentos. Alguns autores têm proposto políticas de manutenção baseadas na observação do nível de degradação efectivo dos componentes. Por exemplo, Curcurù, G. et al. [21], propõem uma política de manutenção preditiva adoptando um modelo estocástico que descreve a evolução do processo de degradação, que visa minimizar o custo global da função manutenção. Também os autores Barata, J. et al. [22], aplicam um modelo de degradação estocástico a sistemas de multi-componentes reparáveis para promover a optimização do programa de manutenção. No modelo, a falha dos componentes ocorre não somente por efeito de um nível de degradação excessivo, mas também em consequência de choques aleatórios.

A manutenção preventiva condicionada baseia-se na análise de um conjunto de parâmetros característicos do funcionamento de um determinado equipamento, recolhidos de uma forma sistemática ao longo da sua vida útil, tendo a capacidade de detectar falhas antes que elas aconteçam, para que a manutenção preventiva possa ser iniciada.

A aplicação de um programa de manutenção condicionada, permite à função manutenção tirar partido de determinadas vantagens [15], a saber:

- **menor número e gravidade de avarias** - Como a condição das máquinas é vigiada regularmente, é possível intervir antes de se verificarem avarias graves;



- **menor tempo de imobilização para reparação** - A análise da condição da máquina permite, frequentemente, identificar os componentes responsáveis pela avaria, reduzindo drasticamente o tempo dedicado ao diagnóstico;
- **custos de manutenção mais baixos** - Como consequência lógica dos dois pontos anteriores, há menor consumo tanto em materiais, como em mão de obra;
- **menos material em stock** - Em vez de manter material em stock à espera da ocorrência da avaria, é possível agora planejar a sua encomenda em tempo útil, por forma a sua entrega coincida com a data planeada para a intervenção.
- **maior vida útil dos equipamentos** - Estando menos sujeitos a avarias graves, e sendo submetidos a manutenção preventiva com prazos e eficácia aferidos pelo programa de controlo de condição, os equipamentos vêem a sua vida útil significativamente aumentada;
- **maior disponibilidade dos equipamentos** - Como o número de intervenções de manutenção obrigando a paragem do equipamento é menor, e a oportunidade das paragens poder ser conciliada com a função de produção, os equipamentos ficam mais tempo disponíveis para o seu fim primário;
- **maior segurança** - A possibilidade de detectar a tempo deteriorações de condição susceptíveis de conduzir a avarias catastróficas permite tomar as medidas adequadas para evitar a sua ocorrência, anulando assim possíveis efeitos nefastos sobre pessoas e bens.

O modelo de avaliação dos custos de manutenção é um modelo matemático que deve contemplar basicamente, os seguintes aspectos:

- Quantificar custos e efeitos (benefícios) de uma estratégia de manutenção;
  - Encontrar o óptimo equilíbrio entre eles.
-



Os custos directos relativos à intervenção preventiva são por natureza inferiores, aos custos relacionados com a avaria, caso ocorra.

Segundo a autora Carnero, M<sup>a</sup>.C. [23], tendo como objectivo avaliar a qualidade técnica de um programa de manutenção preditivo, é possível criar um indicador, denominado de “*eficiência preditiva*”, para cada período de tempo, definido pela seguinte expressão:

$$\sum_i \frac{\text{N}^\circ \text{ de falhas positivas detectadas (manutenção preditiva)}}{\text{N}^\circ \text{ total falhas}} \quad (3.8)$$

Os efeitos das acções de manutenção são fundamentalmente subdivididos em:

- Perfeito – o sistema reparado é considerado bom, como novo (“*as-good-as-new*”);
- Sem efeito - o sistema reparado é considerado mau, como velho (“*as-bad-as-old*”);
- Imperfeito – o sistema reparado é considerado parcialmente bom.

### 3.6. Conclusões do presente Capítulo

A mensagem principal deste capítulo foi apresentar o conceito da técnica de análise de degradação, e sua potencial aplicação nos domínios da Fiabilidade e da Gestão da Manutenção.

Estes conceitos formam as bases para aplicação no capítulo seguinte, no estudo prático de análise de degradação de um componente mecânico da indústria automóvel sujeito ao mecanismo de degradação de desgaste.



---

## 4. Estudo Prático

---

### 4.1. Introdução

Este estudo foi realizado com a preciosa colaboração da empresa Renault Trucks Portugal, mais concretamente a sua sucursal de Castanheira do Ribatejo. A empresa Renault Trucks Portugal é composta por um total de cerca de 120 colaboradores, dos quais cerca de 40 são produtivos afectos às actividades das oficinas. As instalações da sucursal de Castanheira do Ribatejo foram inauguradas em 1999, e as de Vila do Conde em 2003. No conjunto das duas oficinas, o volume de negócios em 2009 rondou os 2,8 milhões de euros e nas peças ultrapassou os 11 milhões [24].

De acordo com o contacto inicialmente estabelecido, e consequente explicação dos objectivos inerentes ao trabalho académico proposto, tentou-se encontrar em conjunto com a Renault Trucks Portugal um componente mecânico que permitisse aplicar a teoria da fiabilidade através da análise de degradação desse mesmo componente, mas que também fosse ao encontro do interesse da empresa em causa.

Desta forma, o estudo recaiu sobre a análise a um componente do sistema de travagem, mais especificamente as pastilhas de travão. Trata-se de um componente cujo parâmetro relacionado com a degradação (desgaste) pode ser mensurável, permitindo assim efectuar leituras esporádicas para a recolha de valores referentes ao par desgaste/distância percorrida (quilómetros). Estas pastilhas equipam os veículos da marca Renault, gama Premium, modelo Estrada HR DXi 4X2. A Figura 4.1 mostra o tipo de camião alvo do presente estudo.



**Figura 4.1: Tractor Renault Premium Estrada HR DXi.**

Face à dificuldade operacional em obter uma quantidade significativa de valores reais de desgaste do componente, motivada pelo tempo limitado para elaboração do trabalho e pela pouca disponibilidade dos operadores cujas frotas utilizam o tipo de veículo seleccionado no sentido de proceder à imobilização periódica dos seus camiões (apesar dos esforços enveredados pela Renault Trucks Portugal), foi decidido efectuar a prossecução do trabalho com recurso a dados simulados.

No entanto, os valores utilizados nas simulações não se afastam muito da realidade, mostrando alguma consistência com as potenciais leituras que se poderiam obter se fosse efectuada uma recolha real ao longo do tempo. Esta afirmação é baseada e fruto de uma pesquisa à base de dados da Renault Trucks Portugal, consequência dos registos reais das intervenções a veículos idênticos ao modelo seleccionado. Nesta base de dados



é possível obter os valores médios correspondentes às distâncias percorridas por estas viaturas com um jogo de pastilhas, desde a sua montagem até à sua substituição.

Apesar do conhecimento destes valores ser à partida um dado importante, podendo numa primeira abordagem diminuir a importância e interesse do estudo proposto, foi possível verificar registos com valores bem distintos, fruto da influência de vários factores, referidos mais à frente no presente trabalho, justificando desta forma a aplicação da metodologia idealizada.

O objectivo do estudo passa então, pela utilização de dados referentes à evolução do desgaste para que, no domínio da Engenharia da Fiabilidade, se determine num determinado instante de utilização (distância percorrida) a vida útil restante do componente em causa por meio de inferência estatística e com recurso à aplicação de software específico (Weibull++ 7) [25].

Trata-se de uma informação bastante útil para qualquer gestor de frota, uma vez que permite atempadamente planear a substituição das pastilhas de travão dos seus veículos, evitando desta forma idas à oficina antes do tempo ou tardiamente, e conjugando as intervenções de manutenção com o planeamento logístico.

## **4.2. Breve Descrição do Sistema de Travagem**

O veículo em estudo está equipado com a última geração de sistemas de travagem pneumáticos com pilotagem electrónica (*Versão 5*), designada por EBS (*Electronic Braking System*). Este sistema adapta, roda a roda, a travagem do veículo às condições de aderência da estrada. O EBS proporciona uma gestão do travão motor em solo molhado nas fases de “redução” evitando o bloqueio das rodas traseiras, assistindo igualmente o arranque em subida.



O sistema de travagem centralizado é munido de discos de travão ventilados à frente e maciços à retaguarda em toda a gama, o que assegura uma manutenção otimizada e uma maior duração de vida das pastilhas.

A Renault Trucks tem ainda disponível outra opção, em que o sistema EBS é complementado com outra função denominada de ESP (*Electronic Stabilisation Programme*), criando o chamado EBS *Full*. Esta versão elimina os efeitos negativos da travagem devido a erros de condução ou das condições da estrada.

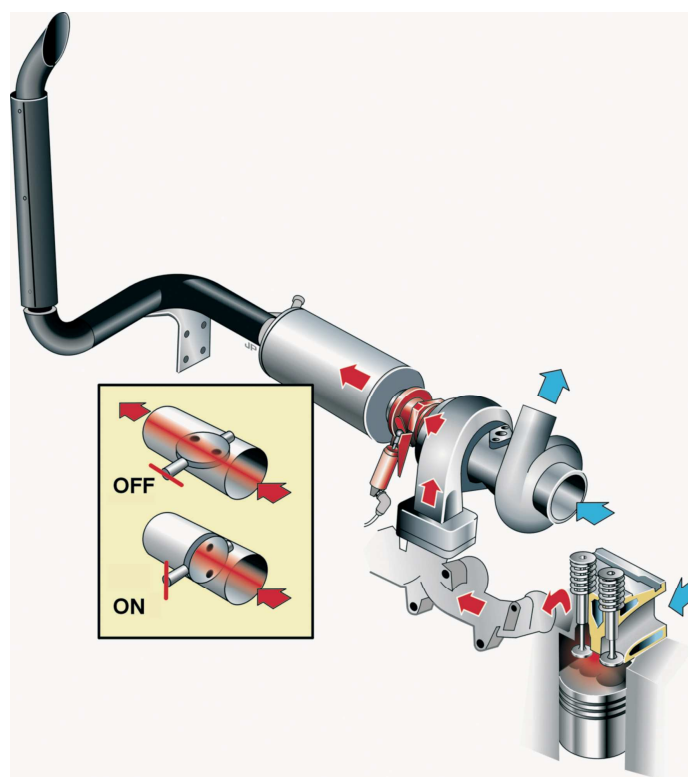
O ESP permite o controlo da trajectória do veículo, evitando o capotamento do conjunto, sobretudo nas curvas em caso de velocidade demasiado elevada, e proporciona uma forte aderência quando o veículo tem um centro de gravidade elevado, reagindo à perda de contacto do camião com o piso da estrada. Cada roda é desta forma controlada individualmente para estabilizar o veículo. A potência de travagem transmitida às rodas direccionais é reduzida, de modo a diminuir o risco de saída da estrada, nomeadamente em curva ou piso molhado.

A Renault está na vanguarda no que concerne ao conceito de sistema de travagem, sendo capaz de combinar travão de escape, travão de motor, retardadores hidráulicos e travões de serviço. Todos estes sistemas são geridos electronicamente para assegurar um óptimo desempenho, prolongando a vida do veículo e contribuindo para a segurança do condutor.

Este sistema de travagem centralizada tem uma segurança excepcional que assegura uma desaceleração de  $7 \text{ m/s}^2$ . A coordenação dos diferentes sistemas de travagem leva a que o desgaste dos travões seja minimizado.

O travão motor, sob a designação de *Optibrake*, disponibiliza uma potência de travagem de 275 kW às 2 300 rpm. A segurança está garantida pelo travão de motor *Optibrake* interligado com os retardadores, sistema EBS e ESP, criando uma combinação altamente eficiente.

O princípio de funcionamento do travão de escape consiste em restringir o fluxo dos gases de escape através do motor, o que diminui a rotação do motor. O sistema é accionado fechando uma válvula de borboleta localizada a seguir ao colector de escape. Essa acção mantém a alta pressão no colector de escape e nos cilindros do motor, que por sua vez age como um travão contra a rotação do motor. O travão de escape é um componente vital do sistema de travagem em veículos pesados, pois aumenta o poder de travagem e a eficácia do sistema. A Figura 4.2 ilustra o princípio de funcionamento do travão de escape.



**Figura 4.2: Princípio de funcionamento do travão de escape.**

### **4.3. Componente em Estudo: Pastilhas de Travão**

O tipo de componente em estudo (pastilhas de travão) está sujeito a um fenómeno de degradação, designado por desgaste. Cada vez que o travão de serviço é accionado pelo condutor do veículo existe um contacto entre as superfícies do par cinemático

pastilha/disco. Uma vez que um destes elementos se encontra animado de um certo movimento, dar-se-á o fenómeno de desgaste de uma das superfícies (a mais macia) por efeito de atrito. O desgaste das pastilhas é função da temperatura gerada, fruto da força aplicada e do seu tempo de actuação.

Existem no mercado diversos tipos ou modelos de pastilhas de travão, dependendo a sua aplicação da marca, modelo e ano do veículo em causa. Para o presente estudo encontra-se especificado pelo fabricante um determinado modelo, cuja foto se encontra apresentada na Figura 4.3.

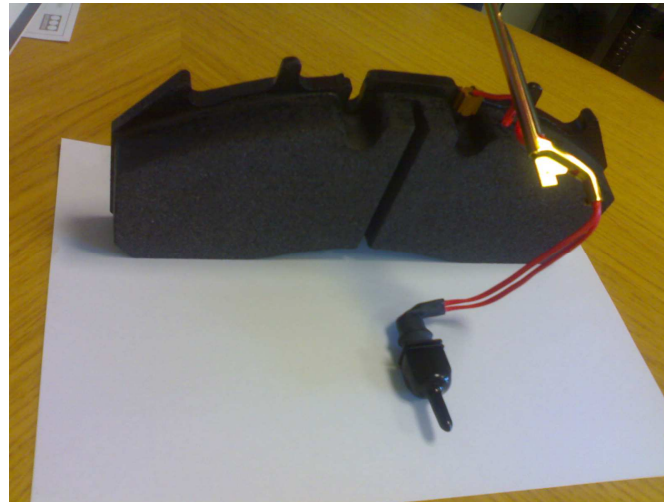


**Figura 4.3: Pastilha de travão (ref.º n.º 7421399929).**

Ainda de acordo com as especificações do fabricante, e confirmado através da medição a uma pastilha de travão nova disponibilizada para o efeito, apresentam-se de seguida algumas características relacionadas com o objecto de estudo, nomeadamente:

- Espessura total inicial do material sujeito a desgaste: 20 mm
- Espessura útil para desgaste (até atingir o limite avisador): 15 mm

As pastilhas em causa têm acoplado um dispositivo de alerta (MSK 5002), transmitindo um sinal luminoso para o painel digital da viatura assim que seja atingido o limite mínimo admissível de espessura (5 mm). A Figura 4.4 mostra o referido dispositivo detector de alarme instalado numa das pastilhas de travão.



**Figura 4.4: Dispositivo de alerta MSK 5002.**

O EBS da Renault conta com uma funcionalidade inovadora, directamente relacionada com o desgaste das pastilhas de travão, ou seja, em função da evolução do desgaste que é registado em cada eixo o sistema instalado faz a gestão automática das forças de travagem aplicadas (por eixo), proporcionando a repartição dessas forças por forma que seja aplicada maior intensidade de travagem no eixo que apresente um menor desgaste das pastilhas de travão, tendo como resultado um equilíbrio ao nível do desgaste das pastilhas de travão entre os eixos.

Este controlo do desgaste de pastilhas não permite que haja uma diferença significativa no desgaste entre os eixos, trazendo desta forma algumas vantagens, como sejam:

- O aumento do tempo de vida útil das pastilhas de travão;
- A diminuição do número de intervenções técnicas efectuadas ao veículo;
- O aumento da disponibilidade do veículo;
- O aumento da rentabilidade do veículo.

De forma a receber a informação do desgaste das pastilhas, cada roda está dotada de um sensor de desgaste, do tipo transdutor de deslocamento, conforme ilustrado na Figura 4.5.



**Figura 4.5: Sensor de desgaste.**

Devido à importância operacional desta função, em caso de avaria deste componente é transmitida uma mensagem de alerta para o painel digital de bordo, similar a outras indicações relacionadas com eventuais anomalias no sistema de travagem (e.g.: temperatura dos discos de travão). A Figura 4.6 mostra o painel de bordo do veículo em estudo, com a indicação de modo de controlo de tracção activo. Para assinalar uma anomalia no sistema de travagem surgirá uma imagem diferente no monitor.



**Figura 4.6: Painel de bordo com mensagem informativa.**

Notemos que o modelo de camião referido neste estudo está, de acordo com o programa de manutenção preconizado pelo fabricante, sujeito a uma inspecção periódica ao sistema de travagem a cada 60.000 quilómetros.



#### **4.4. Factores de Influência no Modelo de Degradação do Componente**

Tal como referido anteriormente, os dados analisados relativos ao desgaste das pastilhas de travão mostram uma grande variação quanto à distância percorrida com a utilização de um jogo de pastilhas, justificada por um conjunto de factores de influência, nomeadamente:

- Tipo de trajecto do veículo – a ter em conta se o serviço é do tipo de distribuição (nacional) ou longo curso (internacional), se é efectuado num perfil montanhoso ou plano;
- Tipo de condução – se é praticada uma condução defensiva ou uma condução mais agressiva;
- Tipo de transporte – a ter em conta o tipo de matérias-primas a transportar (e.g.: mercadorias, tanque, carga seca, etc.);
- Tipo de carga – a considerar o tipo normal de condições de carga (i.e.: plena carga (100%), meia carga (50%), etc.).

Mais à frente será feita referência a estes factores e sua eventual modelação em termos da fiabilidade das pastilhas de travão.

Para além destes factores e por se tratarem de situações atípicas, mas susceptíveis de poderem acontecer, devemos ainda considerar os seguintes factores:

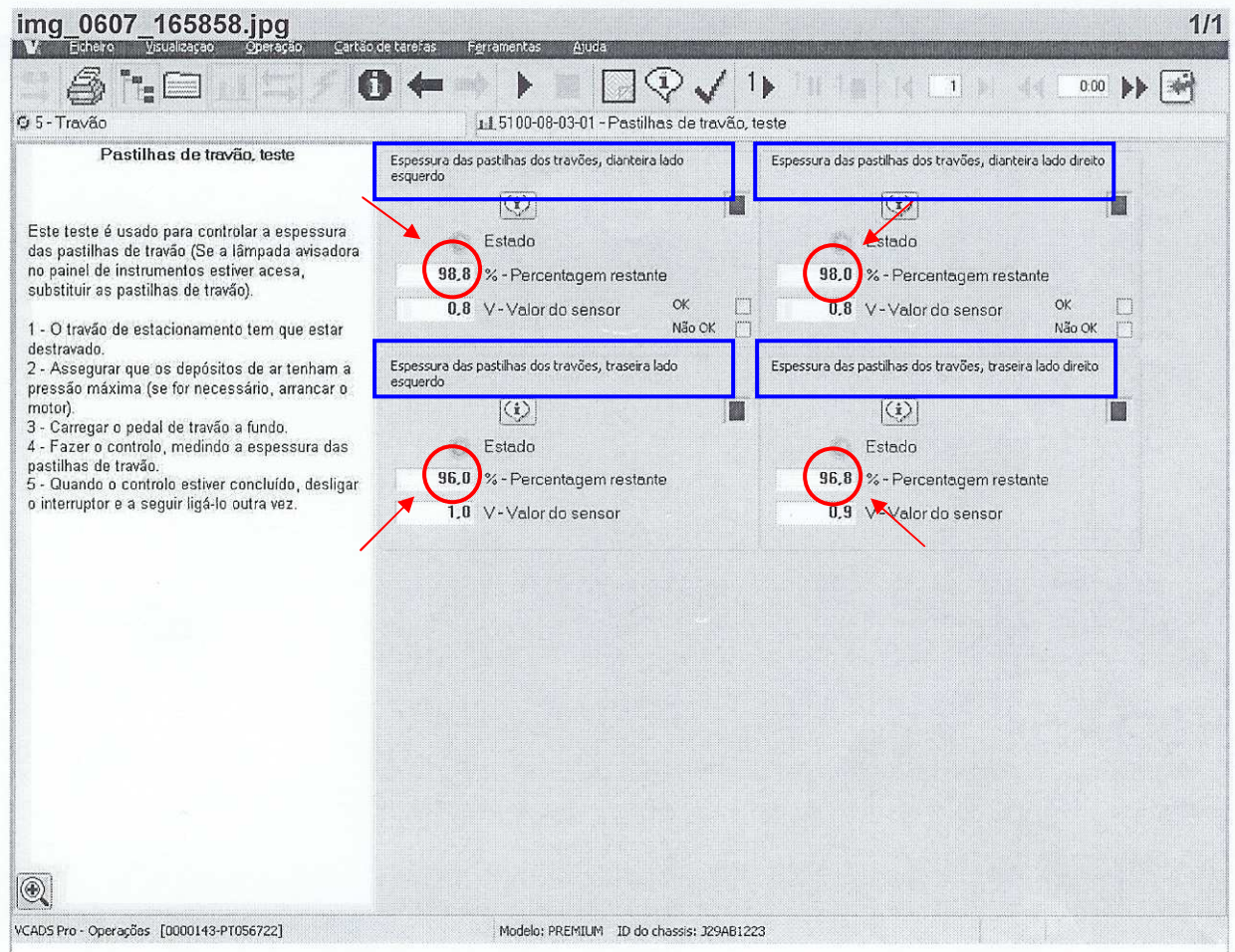
- Prisão dos êmbolos de uma pastilha, provocando um desgaste anormal numa das pastilhas montada numa roda;
- Sensor de desgaste avariado, transmitindo valores de leitura errados;
- Discos de travão rachados, tornando-se essa fissura uma autêntica lâmina que provocará um desgaste mais acentuado e superior ao desgaste normal, que as melhores técnicas de estimativa não conseguem prever.



## 4.5. Equipamento de Diagnóstico

O teste de controlo da espessura das pastilhas de travão é efectuado com recurso a uma ferramenta de diagnóstico denominada *Diag NG3*. Este equipamento fornece a leitura imediata dos valores das quatro rodas, em termos de percentagem restante de material de atrito, sem que seja necessário qualquer intervenção de desmontagem ao nível das rodas.

No fundo, trata-se de uma ligação de um equipamento de diagnóstico ao sistema de gestão centralizado do veículo. Refira-se que, para além da informação sobre a percentagem restante das pastilhas de travão poderão ser recolhidas e analisadas muitas outras informações importantes sobre o comportamento e estado de outros componentes. A Figura 4.7 mostra como exemplo o resultado (*output*) de um teste realizado a uma das viaturas existentes em oficina, num dos momentos da visita às instalações da Renault Trucks Portugal. Uma vez que esta situação se referia a uma viatura nova, pronta para ser entregue ao cliente, os valores analisados mostram que as pastilhas de travão apresentam valores percentuais relativos à espessura restante próximos dos 100% nos dois eixos (dianteiro e traseiro) e em ambas as rodas em cada um desses eixos (lado esquerdo e lado direito).



**Figura 4.7: Resultados de um teste de avaliação da espessura das pastilhas de travão.**

## 4.6. Dados Simulados

Antes de entrar propriamente nos resultados do estudo do caso prático, é conveniente tecer algumas considerações, ligadas ao termo simulação. Para isso, comecemos por enunciar o significado de simulação:

*“É uma ferramenta estatística para analisar sistemas reais, que imita o funcionamento lógico do sistema ao longo do tempo num modelo de computador”.*



A simulação tem inúmeras aplicações práticas, quer a nível estratégico ou a nível operacional. Trata-se de uma técnica que consiste em fazer variar os parâmetros de entrada de um modelo do sistema real e analisar o seu impacto nas medidas de desempenho relevantes. No entanto, não permite na maioria dos casos otimizar os parâmetros de um sistema e obter respostas exactas.

As técnicas de simulação têm sido utilizadas em vários campos da Engenharia. Por exemplo, Hsieh, Min-Hsiung, et al. [26] mostram um estudo para avaliar a fiabilidade de um processo de degradação discreto segundo um determinado programa de inspecções, onde utilizam a simulação para a inferência e a metodologia do processo.

Existem algumas ideias chave subjacentes à técnica de simulação, nomeadamente:

- A simulação não é uma técnica de optimização;
- A simulação não produz uma solução por si só;
- Um modelo de simulação é executado e não resolvido;
- A simulação permite aos analistas testar as suas propostas de solução num modelo que duplique satisfatoriamente o sistema real;
- A simulação é uma ferramenta de análise “*what if*”;
- A simulação pertence à área científica da Investigação Operacional;
- A simulação é uma ferramenta estatística.

#### **4.7. Simulação de um Caso Prático**

Esta aplicação tem como objectivo verificar para um determinado tipo de veículo, a funcionar sob idênticas condições de exploração, qual a fiabilidade (em particular o tempo de vida útil restante) das pastilhas de travão, tendo em consideração um valor mínimo admissível, associado ao mecanismo de degradação deste tipo de componente.



Começou-se por elaborar uma tabela, para uma frota de 5 veículos, partindo do pressuposto que os mesmos efectuem uma revisão a cada 50.000 quilómetros<sup>8</sup>, simulando-se as diversas leituras relativas à percentagem restante de espessura das pastilhas, recolhidas em cada uma das visitas à oficina.

---

<sup>8</sup> NOTA: Os intervalos devem ser diferentes, ou seja, sem que o espaçamento seja de 50000 em 50000 quilómetros certinhos. Até porque, não há nenhum veículo que na realidade vá à revisão nestes valores. Ou vão ligeiramente antes, ou o mais normal é irem depois da "data" que deviam!

---



**Tabela 4.1: Valores simulados de desgaste (NG3 – aparelho de diagnóstico) com indicação de espessura (e) restante e desgaste (d) correspondente, registados em intervalos de 50000 quilómetros, para uma frota de 5 veículos.**

Veículo	MARCA: RENAULT	MODELO: PREMIUM ESTRADA HR Dxi (4x2)	Eixo Frente						Eixo Trás					
			Direita		Esquerda		Direita		Esquerda		Direita		Esquerda	
			% (NG3)	e [mm]	d [mm]	% (NG3)	e [mm]	d [mm]	% (NG3)	e [mm]	d [mm]	% (NG3)	e [mm]	d [mm]
			98,0%	19,60	-	98,2%	19,64	-	98,0%	19,60	-	98,2%	19,64	-
Veículo "A"	Colocação de pastilhas novas em todas as rodas													
	300000	81,1%	16,22	3,78	80,9%	16,18	3,82	78,9%	15,78	4,22	79,2%	15,84	4,16	
	350000	62,4%	12,48	7,52	63,8%	12,76	7,24	61,5%	12,30	7,70	62,5%	12,50	7,50	
	400000	43,7%	8,74	11,26	45,1%	9,02	10,98	41,6%	8,32	11,68	42,0%	8,40	11,60	
	500000													
Veículo "B"	Colocação de pastilhas novas em todas as rodas													
	750000	78,3%	15,66	4,34	79,4%	15,88	4,12	77,6%	15,52	4,48	78,0%	15,60	4,40	
	800000	59,2%	11,84	8,16	61,2%	12,24	7,76	57,1%	11,42	8,58	57,9%	11,58	8,42	
	850000	40,4%	8,08	11,92	41,3%	8,26	11,74	39,4%	7,88	12,12	38,7%	7,74	12,26	
	950000													
Veículo "C"	Colocação de pastilhas novas em todas as rodas													
	1200000	80,3%	16,06	3,94	81,6%	16,32	3,68	79,8%	15,96	4,04	78,7%	15,74	4,26	
	1250000	64,2%	12,84	7,16	65,0%	13,00	7,00	68,0%	13,60	6,40	67,5%	13,50	6,50	
	1300000													
	1350000													
Veículo "D"	Colocação de pastilhas novas em todas as rodas													
	800000	71,2%	14,24	5,76	72,5%	14,50	5,50	74,3%	14,86	5,14	74,0%	14,80	5,20	
	850000	54,4%	10,88	9,12	52,1%	10,42	9,58	56,2%	11,24	8,76	54,8%	10,96	9,04	
	900000	36,2%	7,24	12,76	34,0%	6,80	13,20	35,6%	7,12	12,88	36,9%	7,38	12,62	
	1000000													
Veículo "E"	Colocação de pastilhas novas em todas as rodas													
	200000	84,6%	16,92	3,08	85,0%	17,00	3,00	80,6%	16,12	3,88	81,3%	16,26	3,74	
	250000	71,4%	14,28	5,72	69,8%	13,96	6,04	75,2%	15,04	4,96	78,3%	15,66	4,34	
	300000	41,0%	8,20	11,80	42,9%	8,58	11,42	43,4%	8,68	11,32	45,7%	9,14	10,86	
	350000													
400000														



Com base na tabela anterior, e tendo apenas em consideração os valores registados para o desgaste e o valor de 15 mm como valor máximo admissível, pode-se elaborar a seguinte tabela, reflectindo desta forma, os dados de entrada para o programa informático (Weibull ++7) utilizado na análise da degradação.

**Tabela 4.2: Valores do parâmetro desgaste (d), em cada roda referentes aos 5 veículos, registados em intervalos de 50000 quilómetros.**

Veículo "A" Distância	d [mm]			
	FD	FE	TD	TE
50000	3,78	3,82	4,22	4,16
100000	7,52	7,24	7,70	7,50
150000	11,26	10,98	11,68	11,60

Veículo "B" Distância	d [mm]			
	FD	FE	TD	TE
50000	4,34	4,12	4,48	4,40
100000	8,16	7,76	8,58	8,42
150000	11,92	11,74	12,12	12,26

Veículo "C" Distância	d [mm]			
	FD	FE	TD	TE
50000	3,94	3,68	4,04	4,26
100000	7,16	7,00	6,40	6,50
150000	0,00	0,00	0,00	0,00

Veículo "D" Distância	d [mm]			
	FD	FE	TD	TE
50000	5,76	5,50	5,14	5,20
100000	9,12	9,58	8,76	9,04
150000	12,76	13,20	12,88	12,62

Veículo "E" Distância	d [mm]			
	FD	FE	TD	TE
50000	3,08	3,00	3,88	3,74
100000	5,72	6,04	4,96	4,34
150000	11,80	11,42	11,32	10,86

Legenda:

FD – Roda da frente direita;

FE – Roda da frente esquerda;

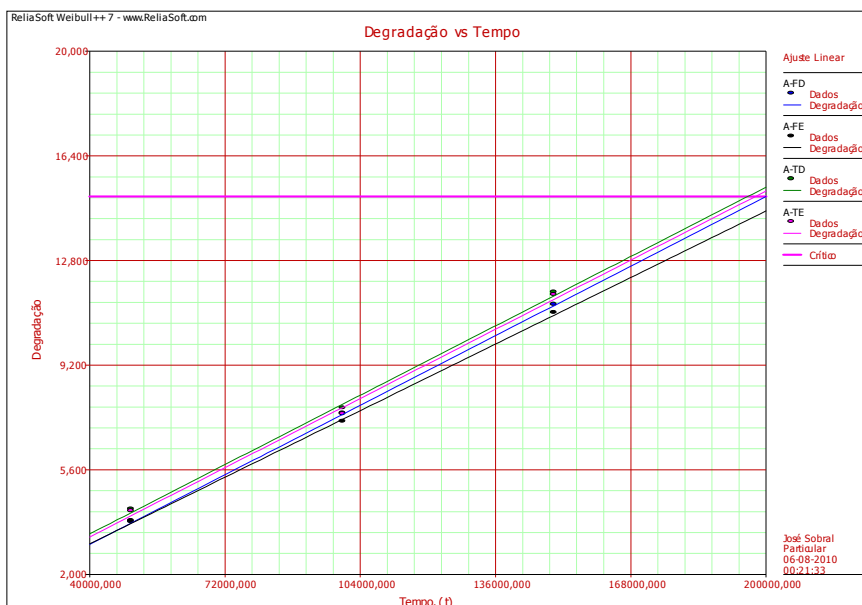
TD – Roda traseira direita;

TE – Roda traseira esquerda.

Introduzindo os valores anteriores, e analisando cada veículo isoladamente, ao fazer-se o ajustamento aos vários modelos matemáticos de tendência da degradação das pastilhas de travão (Linear, Exponencial, Potência, Logarítmico e Lloyd-Lipow<sup>9</sup>), obtêm-se os seguintes resultados:

**Tabela 4.3: Valores dos parâmetros para o veículo “A”.**

Veículo	Modelo	ID Un.	Parâm. a	Parâm. b	Km até à Falha
"A"	Linear	A-FD	7,48E-05	4,00E-02	200000
		A-FE	7,16E-05	0,18667	206890
		A-TD	7,46E-05	0,40667	195621
		A-TE	7,44E-05	0,31333	197401

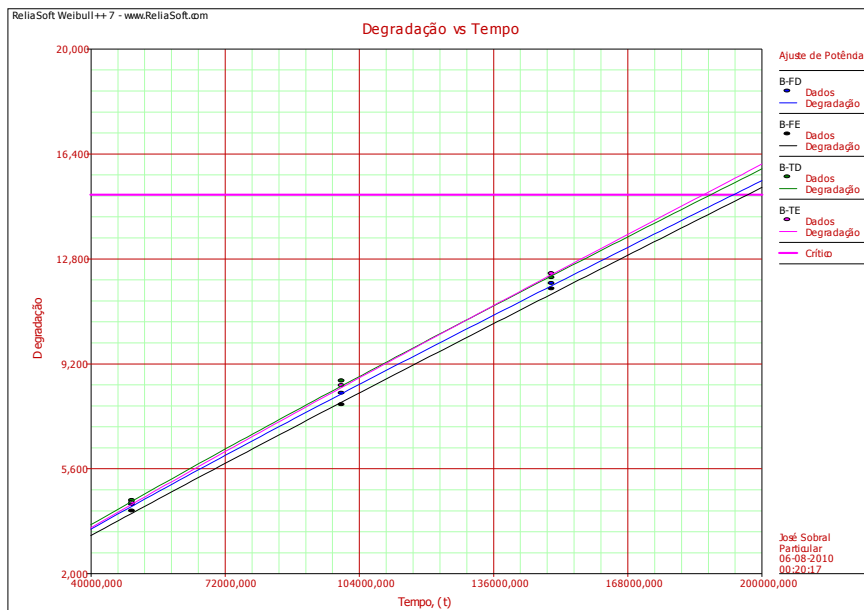


**Figura 4.8: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “A”.**

<sup>9</sup> NOTA: Não foi considerado o modelo de Gompertz, uma vez que para uma amostra inferior a 4 pontos este modelo não converge para uma solução precisa.

**Tabela 4.4: Valores dos parâmetros para o veículo “B”.**

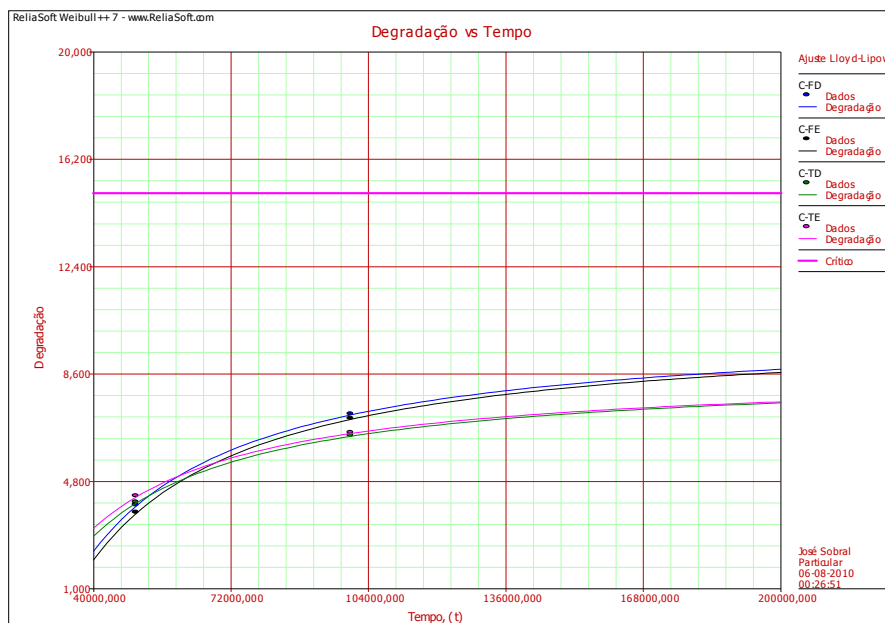
Veículo	Modelo	ID Un.	Parâm. a	Parâm. b	Km até à Falha
"B"	Potência	B-FD	9,19E-01	2,09E-04	193162
		B-FE	9,49E-01	1,42E-04	196532
		B-TD	9,09E-01	2,40E-04	187766
		B-TE	9,33E-01	1,82E-04	185993



**Figura 4.9: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “B”.**

**Tabela 4.5: Valores dos parâmetros para o veículo “C”.**

Veículo	Modelo	ID Un.	Parâm. a	Parâm. b	Km até a Falha
"C"	Lloyd-Lipow	C-FD	1,04E+01	3,22E+05	
		C-FE	1,03E+01	3,32E+05	
		C-TD	8,76E+00	2,36E+05	
		C-TE	8,74E+00	2,24E+05	

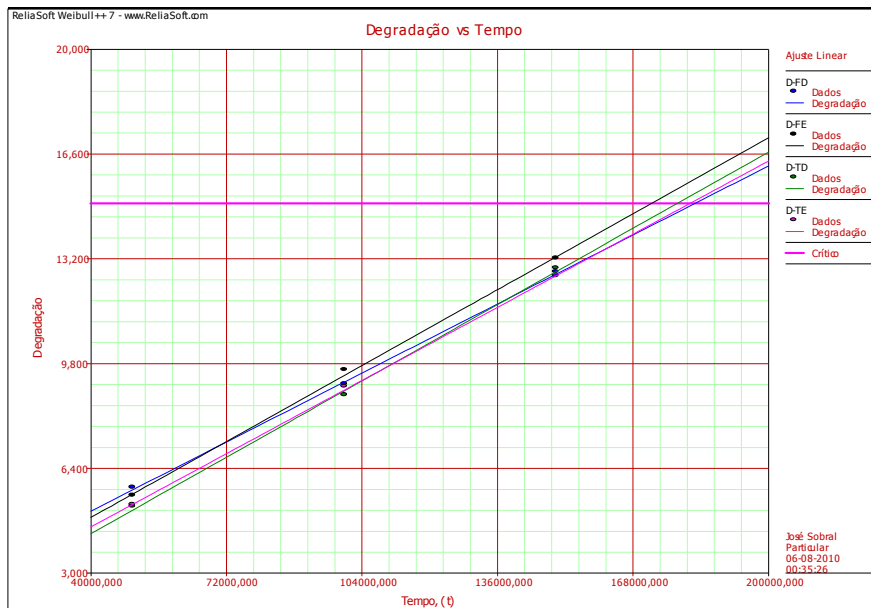


**Figura 4.10: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “C”.**

No caso do veículo “C”, não são apresentados os valores referentes aos quilómetros até à falha, uma vez que é impossível a sua determinação face ao modelo seleccionado. Tal facto, deve-se à escassez de dados para cada uma das rodas do referido veículo. O veículo em causa (Veículo “C”) não será considerado nos passos seguintes da metodologia.

**Tabela 4.6: Valores dos parâmetros para o veículo “D”.**

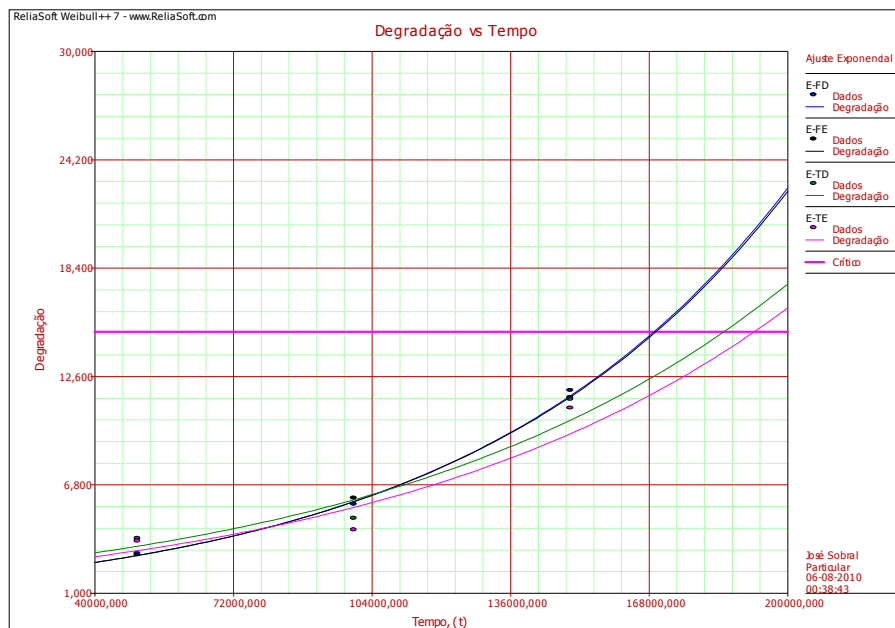
Veículo	Modelo	ID Un.	Parâm. a	Parâm. b	Km até à Falha
"D"	Linear	D-FD	7,00E-05	2,21E+00	182667
		D-FE	7,70E-05	1,73E+00	172381
		D-TD	7,74E-05	1,19E+00	178467
		D-TE	7,42E-05	1,53E+00	181491



**Figura 4.11: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “D”.**

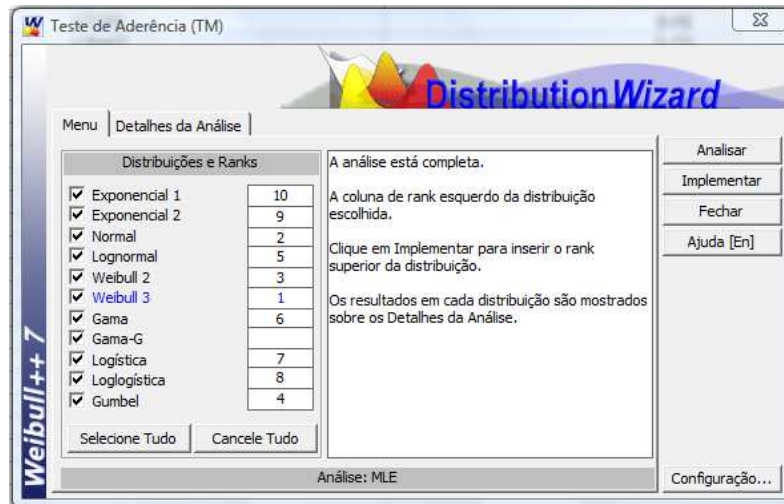
**Tabela 4.7: Valores dos parâmetros para o veículo “E”.**

Veículo	Modelo	ID Un.	Parâm. a	Parâm. b	Kms até à Falha
"E"	Exponencial	E-FD	1,34E-05	1,55E+00	169169
		E-FE	1,34E-05	1,55E+00	169616
		E-TD	1,07E-05	2,06E+00	185310
		E-TE	1,07E-05	1,93E+00	192311



**Figura 4.12: Curvas de tendência de degradação, referentes ao veículo “E”.**

Agora, na posse dos dados extrapolados dos tempos até à falha, pode-se verificar qual a distribuição que mais se ajusta. De acordo com os testes estatísticos efectuados, é seleccionada a distribuição de Weibull (3 parâmetros).



**Figura 4.13: Teste de Aderência com a distribuição ajustada aos dados de vida - Weibull tripamétrica.**

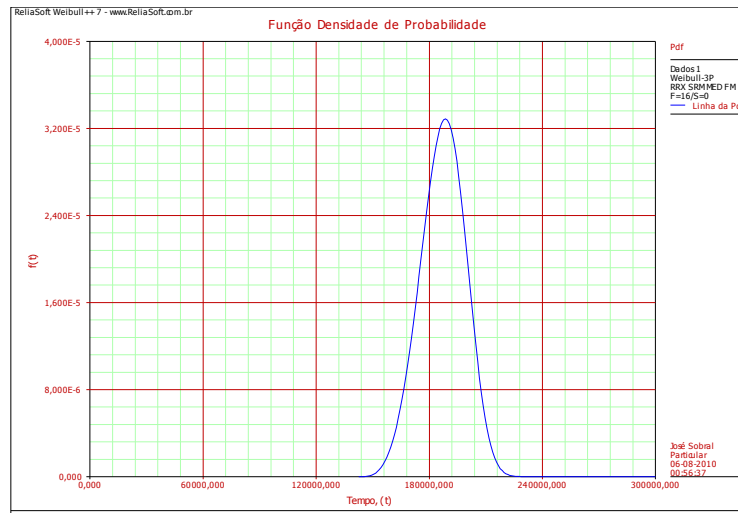
Este ajustamento apresenta um coeficiente de correlação elevado ( $\rho = 0,9838$ ). Os parâmetros da distribuição são:

$$\beta = 4,2432$$

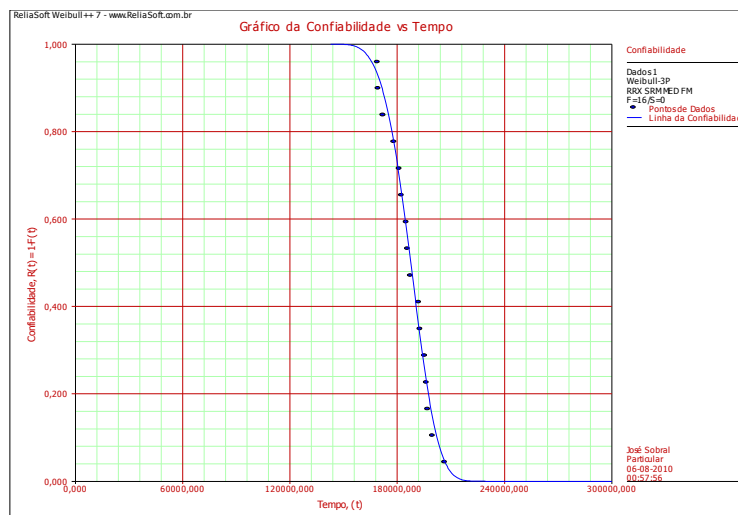
$$\eta = 187180 \text{ km}$$

$$\gamma = 142680 \text{ km}$$

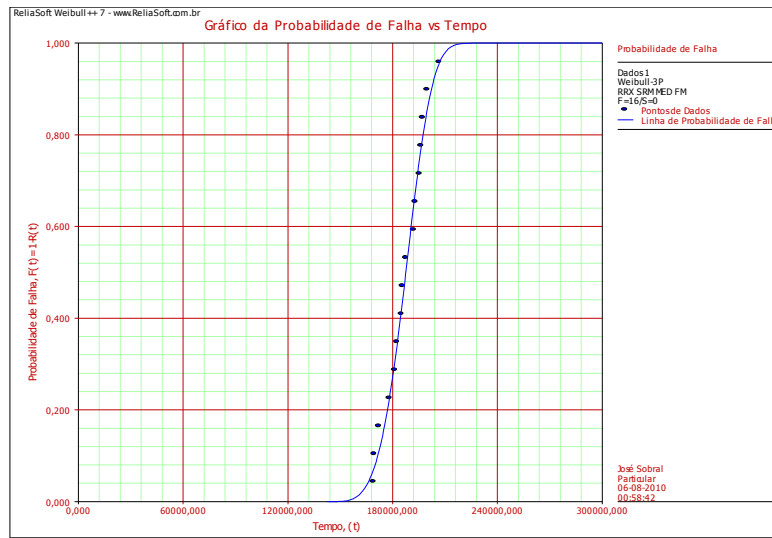
Conseguimos agora com recurso ao programa informático rapidamente mostrar gráficos referentes à função densidade de probabilidade de falha, à função fiabilidade e à função cumulativa da probabilidade de falha.



**Figura 4.14: Gráfico da função Densidade de Probabilidade de Falha.**



**Figura 4.15: Gráfico da função Fiabilidade.**



**Figura 4.16: Gráfico da função Cumulativa da Probabilidade de Falha.**

Assim, é possível determinar a fiabilidade para um determinado número de quilómetros, ou saber qual a distância percorrida por um veículo desde que se colocaram pastilhas novas, com o objectivo de não ultrapassar uma determinada probabilidade de falha.

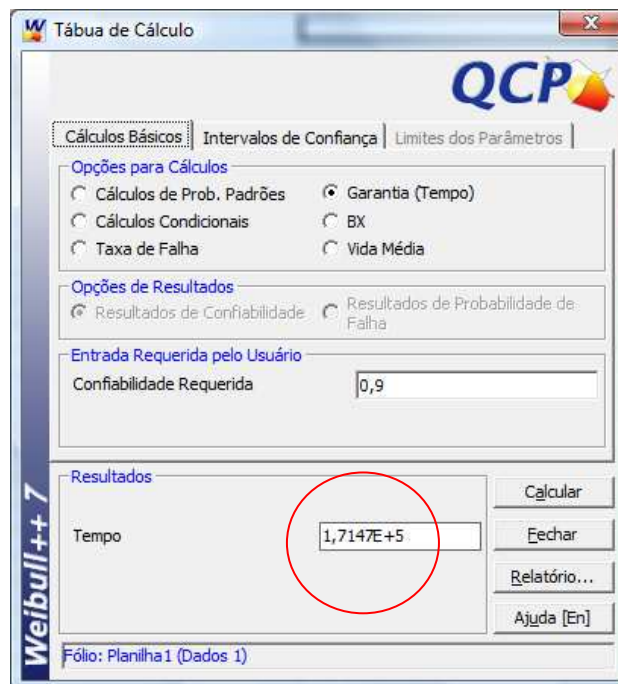
Nas figuras abaixo são apresentados os quadros de resultados fornecidos pelo programa informático, com a respectiva análise e interpretação dos mesmos:

Por exemplo, a Figura 4.17 apresenta uma vida média das pastilhas igual a 187180 quilómetros.



**Figura 4.17: Vida média das pastilhas.**

A Figura 4.18 dá-nos uma garantia de uma fiabilidade de 0,90 (probabilidade de falha igual a 0,10) aos 171470 quilómetros.



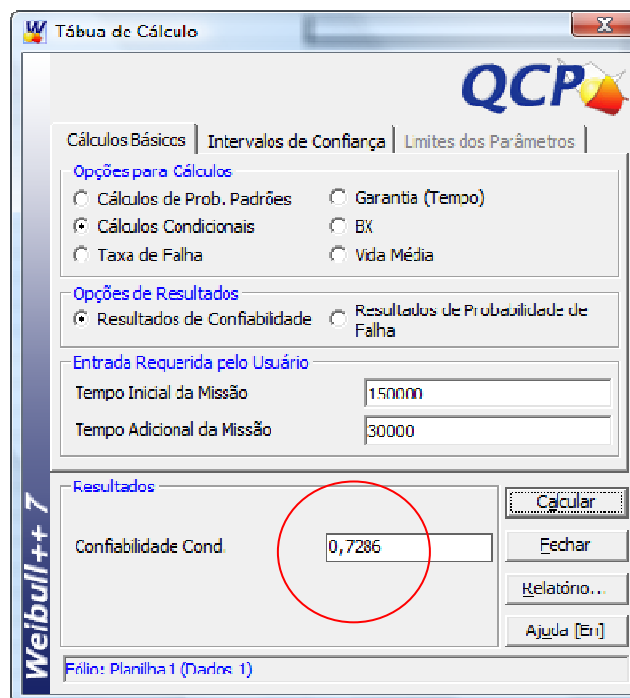
**Figura 4.18: Tempo (quilómetros) para garantia de uma Fiabilidade de 0,90.**

Na Figura 4.19 temos uma fiabilidade de 0,1412 aos 200000 quilómetros.



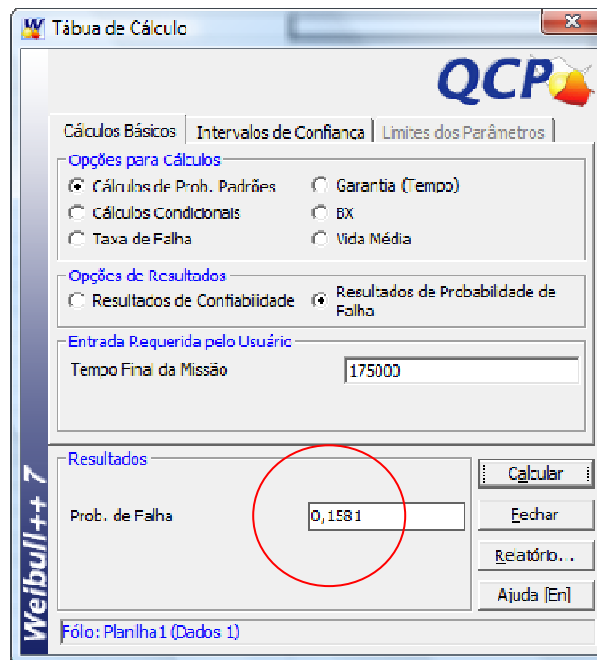
**Figura 4.19: Fiabilidade para uma missão de 200000 quilómetros.**

Por exemplo, a Figura 4.20 representa a fiabilidade para uma missão de 30000 quilómetros, quando já estão percorridos 150000 quilómetros é de 0,7286.



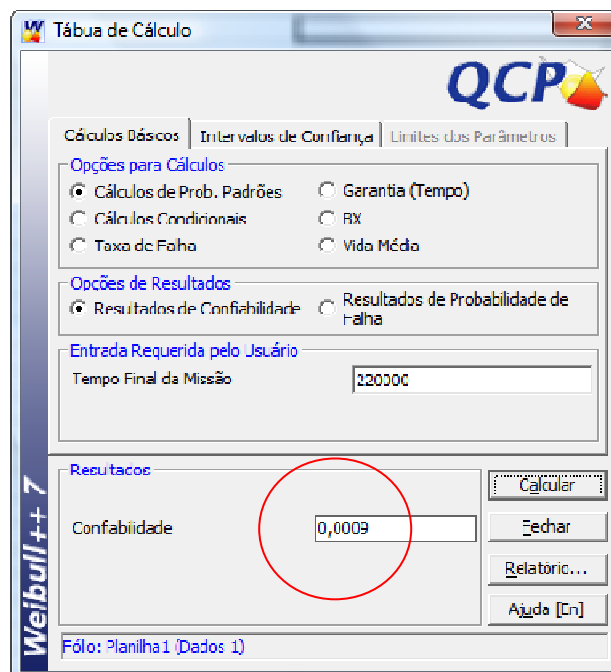
**Figura 4.20: Fiabilidade Condicional para uma missão de 30000 quilómetros.**

A Figura 4.21 revela que a probabilidade de falha aos 175000 quilómetros é de 0,1581.



**Figura 4.21: Probabilidade de Falha para uma missão de 175000 quilómetros.**

A Figura 4.22 mostra que a probabilidade de chegar aos 220000 quilómetros é de 0,0009 (0,09%).



**Figura 4.22: Fiabilidade para uma missão de 220000 quilómetros.**



## 4.8. Conclusões do presente Capítulo

O estudo permitiu conhecer o princípio de funcionamento dum sistema de travagem com gestão electrónica centralizada de última geração, que equipa este tipo de veículos. Na prática a utilização de dados simulados sujeitos a tratamento estatístico teve como resultado final a apresentação de um quadro de valores que nos permite de uma forma clara fazer a avaliação da fiabilidade deste componente. O conhecimento da fiabilidade das pastilhas pode levar à optimização da sua exploração, simbolizando poupanças significativas ao nível da gestão deste tipo de bens, nomeadamente na elaboração de estimativas de custo anuais, aprovisionamento e conhecimento particular de cada veículo quanto à RUL (quilómetros) para as pastilhas. O modelo agora desenvolvido permite responder ao seguinte tipo de questões:

*“Qual a distância que o veículo ainda pode percorrer, em condições semelhantes às registadas até ao momento, até se atingir o valor de alerta (valor máximo de desgaste admissível)?”.*



---

## 5. Conclusões e sugestões para o Futuro

---

### 5.1. Conclusões

A análise de dados de degradação apresenta-se como uma alternativa económica e eficaz aos tradicionais testes de fiabilidade. A possibilidade de se obter estimativas de fiabilidade de um bem sem haver a necessidade que a falha ocorra, representa um avanço considerável nos dias actuais, em que os prazos de desenvolvimento de novos produtos são cada vez menores. Contudo, o uso de testes de degradação só pode ser possível quando as falhas são devidas a um processo de degradação conhecido, que possa ser mensurável e que possa ser modelado usando um modelo estatístico adequado.

É importante realçar que a técnica de análise de degradação é uma ferramenta de alto potencial dentro da Engenharia da Fiabilidade, que agiliza o desenvolvimento de novos produtos. O uso da técnica é genérico e pode ser aplicada nas mais diversas indústrias.

Os modelos matemáticos apresentados neste trabalho adequam-se a uma variedade muito grande de produtos, e a escolha do modelo que mais se ajusta irá depender do



produto em análise e das suas características no que se refere à queda de desempenho ao longo do tempo.

Podemos assim concluir que uma recolha dos valores reais de degradação em componentes ou equipamentos permite com recurso à extrapolação desses valores obter o valor estimado do TTF, e através do tratamento dessa informação, obter dados acerca de tempos médios de vida, probabilidades de falha, taxas de avarias, etc.

O papel essencial da análise da degradação como ferramenta de apoio na estratégia de manutenção assenta em duas vertentes fundamentais: a primeira no controlo de condição dos componentes, ou sistemas, com base na monitorização da evolução dos dados de desempenho até que se atinja um limite admissível preestabelecido (considerado como falha), ou seja, uma política genuína de manutenção condicionada; a segunda na recolha de dados de desempenho, e posterior tratamento estatístico, que com base na previsão, se possa estima o tempo de falha, isto é, de uma manutenção preditiva.

A ideia transmitida com o presente caso prático será antes de mais mostrar a metodologia e suas vantagens ao ser aplicada. Podemos especificar valores sustentados para fiabilidades relacionadas com tempos de vida e enunciar valores creíveis para justificar a nossa actuação numa óptica de manutenção condicionada. A importância de toda essa informação é vital, para gestores de frota, responsáveis da manutenção e outras funções similares, que conseguem otimizar os intervalos de tempo entre revisões, e em simultâneo maximizar o tempo de vida útil do componente.

O trabalho desenvolvido releva o facto de existirem inúmeros modelos baseados em processos reais de degradação, cuja aplicação pode ser direccionada a vários tipos de indústria, visando incrementar valores fulcrais para as organizações como a Qualidade, a Disponibilidade e a Segurança.

A abordagem da metodologia aqui desenvolvida pretende sensibilizar gestores, engenheiros e chefias para a existência de mais uma ferramenta de auxílio que têm ao seu dispor, na árdua tarefa de tomada de decisões, onde por vezes o tempo é um dos factores chave para o sucesso.

---



## 5.2. Sugestões para o Futuro

O objectivo futuro passaria por criar um modelo, que tendo por base uma colecção de dados reais, que por meio de inferência estatística entrasse em linha de conta com todos os factores que podem influenciar o mecanismo de desgaste das pastilhas, por forma a que de acordo com as diversas missões futuras a desenvolver sob determinadas condições se possa prever o desgaste.

A modelação seria tanto mais eficiente, quanto maior a amostra de dados recolhidos, que iria permitir definir os parâmetros desse modelo. Estes parâmetros são definidos em termos das variáveis associadas ao mecanismo de degradação em estudo, essencialmente definidas: quanto ao tipo de trajecto, montanhoso ou plano, distribuição ou longo curso; quanto ao tipo de condução, mais agressiva ou menos agressiva; e ainda quanto ao tipo de carga, 100% de carga, 75% de carga, 50% de carga ou 25% de carga (ou outras).

Por exemplo, para um determinado veículo em que a sua próxima missão possuísse as seguintes características:

- Distância total do percurso = 3500 quilómetros;
- Percurso tipo montanhoso;
- Trajecto tipo longo curso;
- Motorista com uma condução tipo defensiva;
- Tipo de carga = 50% de carga.

O modelo desenvolvido poderia permitir responder a questões como:

- Qual o desgaste expectável no final da missão?
- Qual o custo aproximado afecto ao desgaste do componente?

Obviamente que a construção de um modelo com estas características e com um leque de variáveis de entrada tão vasto pressupunha um estudo mais complexo e um

---



conhecimento do modo como cada um destes factores influenciaria o modo de degradação em estudo. Qualquer erro na construção de um modelo com esse tipo de complexidade aumentaria o grau de incerteza global através da propagação das incertezas parciais adstritas a cada uma das variáveis do modelo.

Com a elaboração do presente trabalho espera-se ter dado um passo no sentido da criação de futuros modelos que incorporem novas variáveis, devidamente estudadas e consubstanciadas na análise de dados recolhidos num contexto real de operação, sempre com o objectivo de ajudar os técnicos, decisores ou gestores a tomar as melhores opções em termos de manutenção e exploração.



## Referências

---

- [1] IPQ, *Terminologia da Manutenção* Norma portuguesa NP EN 13306, Edição Set.2007
- [2] Carinhas, H.P., *Manual de Fiabilidade*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Fev.2009
- [3] Dhillon, B.S., *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*, Taylor & Francis Group., LLC, 2006
- [4] Moss, T.R., *The Reliability Data Handbook*, Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmunds, UK, 2005
- [5] [http// www.weibull.com](http://www.weibull.com) acedido em 17 de Março de 2010.
- [6] Blache, K. M. and Shrivastava, A. B., *Defining Failure of Manufacturing Machinery & Equipment*, Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium 1994
- [7] Zhu, Y., Elsayed, E.A., Liao, H. and Chan, L.Y., *Availability optimization of systems subject to competing risk*, European Journal of Operational Research, Vol. 202: pp. 781–788, 2010
- [8] Wang, X., *Wiener processes with random effects for degradation data*, Journal of Multivariate Analysis, Vol. 101: pp. 340-351, 2010
- [9] Assis, Rui, *Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos*, Lidel – Edições Técnicas, Lda, Março 2010, ISBN: 978-972-757-605-0



- [10] Oliveira, Viviane Ribeiro B. and Colosimo, Enrico A., *Comparison of Methods to Estimate the Time-to-failure Distribution in Degradation Tests*, Quality and Reliability Engineering International, Vol. 20: pp. 363–373, 2004
- [11] Jiang, R. and Jardine, A.K.S., *Health state evaluation of an item: A general framework and graphical representation*, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 93: pp. 89–99, 2008
- [12] Chinnam, R. B., *On-line reliability estimation for individual components using statistical degradation signal*, Quality and Reliability Engineering International, Vol. 18: pp. 53–73, 2002
- [13] Soro, Isaac W., Nourelfath, M. and Ait-Kadi, D., *Performance evaluation of multi-state degraded systems with minimal repairs and imperfect preventive maintenance*, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 95: pp. 65–69, 2010
- [14] Sobral, J.A., e Ferreira, L.A., *An Approach to Dynamic Maintenance Based on Actual Data*, Proceeding of the 34<sup>th</sup> ESReDA Seminar, San Sebastian, Spain, May.13-14.2008
- [15] Sobral, J.A., e Ferreira, L.A., *Análise e Tratamento de Parâmetros Reais de Degradação de Componentes na Óptica da Manutenção Condicionada*, 9<sup>o</sup> Congresso Nacional de Manutenção, Exponor, Leça da Palmeira, 22-23 Nov.2007
- [16] Escobar, Luis A., and Meeker, William Q., *A Review of Accelerated Test Models*, Statistical Science, Vol. 21, No. 4, pp. 552–577, 2006
- [17] Reliability HotWire, *Manutenção Condicional Usando Intervalo P-F ou Ponto Inicial da Detecção de Falha (FDT)*, The eMagazine for the Reliability Professional, Edição 40, Julho 2008



- [18] Jiang, R., *Optimization of alarm threshold and sequential inspection scheme*, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 95: pp. 208–215, 2010
- [19] Zhang, S., Ma, L., Sun, Y. and Mathew, J., *Asset health reliability estimation based on condition data*, Proceedings World Congress on Engineering Asset Management, Harrogate, England, pp. 2195-2204, 2007
- [20] Zhao, Z., Wang, Fu-li; Jia, Ming-xing; and Wang S., *Predictive maintenance policy based on process data*, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Vol. 103: pp. 137–143, 2010
- [21] Curcurù, G., Galante, G. and Lombardo, A., *A predictive maintenance policy with imperfect monitoring*, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 95: pp. 989–997, 2010
- [22] Barata, J., Soares, C. Guedes, Marseguerra, M. and Zio, E., *Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating systems for ‘on condition’ maintenance optimisation*, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 76: pp. 255-264, 2002
- [23] Carnero, M<sup>a</sup>. Carmen, *An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programmes*, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 91: pp. 945–963, 2006
- [24] *Jornal das Oficinas*, AP Comunicação, Maio 2010
- [25] ReliaSoft Corporation, Weibull ++7, Version 7.5.1, 2007
- [26] Hsieh, Min-Hsiung; Jeng, Shuen-Lin; and Shen, Pao-Sheng, *Assessing device reliability based on scheduled discrete degradation measurements*, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 24: pp. 151–158, 2009