



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO–UNICAP

PRÓ-REITORIA ACADÊMICA – PRAC

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA NA
ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE COMPONENTES
CONSTRUTIVOS

Celio Costa Souto Maior

Orientador : Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira

Recife

2009

CÉLIO COSTA SOUTO MAIOR

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA NA
ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE COMPONENTES
CONSTRUTIVOS**

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial , exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil , para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Tecnologia das Construções, orientada pelo Professor Doutor Romilde Almeida de Oliveira

Recife

2009

S728a

Souto Maior, Célio Costa

Aplicação da análise de sobrevivência na estimativa da vida útil de componentes construtivos / Célio Costa Souto Maior ; orientador Romilde Almeida de Oliveira, 2010.

119 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino, Pesquisa e Extensão. Mestrado em Engenharia Civil, 2010.

1. Construção civil. 2. Confiabilidade (engenharia) - Métodos estatísticos. 3. Materiais de construção - Durabilidade. I. Título.

CDU 624

CÉLIO COSTA SOUTO MAIOR

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA NA
ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE COMPONENTES
CONSTRUTIVOS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica e Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Concentração em Engenharia das Construções.

Aprovado por:

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira
(Orientador – Engenharia Civil – UNICAP)

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
(Examinador interno – Engenharia Civil – UNICAP)

Prof. Dr. Cezar Augusto Cerqueira
(Examinador externo – Engenharia Civil - UPE)

Data: 30 / 12 / 2009

Recife

2009

DEDICATÓRIA

A Deus, por mais uma etapa cumprida

A meu pai (*em memória*) e minha mãe que nunca mediram esforços e tanto lutaram pela minha educação.

Ao meu filho pelo carinho e apoio, e para inspirá-lo nessa estrada da vida.

Aos meus irmãos, pelo incentivo que sempre me deram.

A todos que colaboraram para a realização desse trabalho.

Agradecimentos

Quero expressar meus sinceros agradecimentos ao Professor Doutor Romilde Almeida de Oliveira pelo seu apoio fundamental, orientação, atenção, esclarecimentos e sugestões valiosas desde o início do Curso de Mestrado e durante este trabalho.

Aos Professores do Mestrado José Orlando Vieira Filho, Sílvio Romero de Melo Ferreira, Joaquim Teodoro Romão de Oliveira, Fernando Artur Nogueira Silva, Maria da Graça Ferreira, Paulo Roberto do Lago Helene e Oscar Cavalcante da Fonte, integrantes da Pós-Graduação da UNICAP, pela contribuição dada , pelos ensinamentos e incentivo,

Aos Professores Sérgio Murilo Maciel Fernandes , Cezar Augusto Cerqueira , Fernando Cezar e Cleto Bezerra de França, pelo crédito, incentivo , apoio e discussões e a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos colegas do mestrado Clério Bezerra de França, Sergio Carvalho de Paiva , Wellington Amorim Rêgo, Cleto Bezerra de França, Carlos Alberto Martins e Antonio Augusto Costa de Azevedo, pelos trabalhos que realizamos em conjunto.

Aos funcionários da UNICAP: do Laboratório de Materiais André Miranda dos Santos e Washington Silva Espósito, pelo apoio dado na execução dos ensaios dos corpos-de-prova, esclerometria e ultrason e da Secretaria do Mestrado Nicéas Izabel Alves, Nélia Babosa de Queiroz Lemos e Alexandra Rodrigues Pereira da Silva, pelo apoio burocrático e no atendimento exemplar..

À Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), pelo suporte financeiro através da bolsa de mestrado

Por fim agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho foi elaborado, na tentativa de se aplicar as técnicas e os conceitos que são empregadas na Análise de Sobrevivência, na medicina e aplicá-los na Engenharia Civil, na área de construção. Essas técnicas recebem o nome de Confiabilidade, onde permite estimar a vida útil de componentes construtivos, através de modelos probabilísticos mais usados nessa área. Esses modelos foram desenvolvidos e aplicados nos dados colhidos, com uma confiabilidade de 95%. Esse assunto, nessa área, já vem sendo estudado na comunidade científica, mas especificamente na área da construção civil pouco se conhece, encontrando-se ainda a fase embrionária, merecendo um estudo mais aprofundado. Logo nossa proposição foi a de a partir de análise feita em uma amostra para estudo, tirar algum proveito ou alguma informação que possa ajudar para trabalhos futuros. Foram coletados 60 amostras para estudo, sendo que 10 delas foram censuradas, onde o estudo terminou com um número pré-determinado de amostras estudadas. Os resultados foram obtidos através do software R, sendo comparados os modelos Exponencial, Weibull e Log-normal, com o estimador de Kaplan-Meier, mostrando tanto graficamente como através de testes, qual melhor modelo se ajusta aos dados coletados. O modelo que melhor se ajustou foi o Log-normal.

Palavras-chave: Construção, Confiabilidade, Kaplan-Meier, Exponencial, Weibull, Log-normal.

ABSTRACT

This Work was developed as an effort to utilize the techniques and concepts that are employed in Survival Analysis in medicine, in order to apply them in Civil Engineering in the construction area. These techniques is called Reliability, which allows estimating the life time of building components through probabilistic models commonly used in that area. These models were developed and applied to the collected data, with a reliability of 95%. This subject, in this area have been studied in the scientific community, but specifically in the construction area is poorly known and is still in its beginning and, deserves further study. Thus, our proposition was to take some benefit or some information that might help for future work from analysis of a sample to study. 60 samples were collected for study, and 10 of them were censored, so that the study ended with a predetermined number of samples. The results were obtained using the software R and compared the models Exponential, Weibull and Log-normal, with the Kaplan-Meier estimator showing both graphically and through tests, which model best fits the data collected. The model that best fitted was the log-normal.

Keywords: Construction, Reliability, Kaplan-Meier, Exponential, Weibull, Log-normal.

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 Normas ISO 15686 interligada com Método dos Fatores	31
Tabela 2.2 Classes de agressividade ambiental	48
Tabela 3.1 Estimativas das Funções de Confiabilidade e de Taxa de Falha .	62
Tabela 3.2 Estimativas de Kaplan-Meier	66
Tabela 3.3 Distribuição de Frequência.....	77
Tabela 3.4 Frequências observadas, relativas e acumuladas	78
Tabela 3.5 Estimativas de kaplan-Meier, Exponencial, weibull e Log-normal	93
Tabela 3.6 Resultado das probabilidades encontradas nos testes de adequação para os modelos Exponencial, Weibull e Log-normal	101

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão nas armaduras	20
Figura 2.2 Relação entre a perda de desempenho das propriedades de um elemento e os mínimos aceitáveis, identificando aquela que condiciona a vida útil da construção.....	26
Figura 2.3 Pirâmides do Egito	37
Figura 2.4 Colapso das Torres do Trade Word Center.....	44
Figura 3.1 Tipos de dados de confiabilidade	56
Figura 3.2 Funções de confiabilidade para dois componentes	57
Figura 3.3 Três funções de taxa de falha: 1 – crescente; 2 - constante e 3 – decrescente	59
Figura 3.4 Histograma da distribuição de frequência dos Tempos de falha	61
Figura 3.5 Gráfico das Taxas de Falhas x Tempos	62
.	
Figura 3.6 Gráfico da Sobrevivência e respectivos intervalos de confiança Com 95 % de confiança, estimados a partir do Estimador de Kaplan-Meier	69
Figura 3.7 Formas típicas da Função de Confiabilidade da Distribuição Exponencial	72
Figura 3.8 Forma típica Função da Taxa de Falha da Distribuição de Weibull	77
Figura 3.9 Gráfico dos Tempos de Vida x Probabilidade, para determinação de t_0	79
Figura 3.10 Gráfico de Confiança dos componentes	83

	Página
Figura 3.11 Manutenção preventiva e corretiva	85
Figura 3.12 Representação dos custos em função da fase de vida da estrutura em que a intervenção é feita	86
Figura 3.13 Função da Taxa de Falha tipo “banheira”	90
Figura 3.14 Gráficos das Sobrevivências estimadas por Kaplan-Meier, versus as Sobrevivências estimadas pelos modelos Exponencial, Weibull e Log-normal	96
Figura 3.15 Gráfico dos tempos versus modelos Kaplan-Meier, Exponencial, Weibull e Log-normal.	97

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
C*	Estatística teste
Cmc	Custo de Manutenção Corretiva
Cmp	Custo de manutenção Preventiva
Exp	Exponencial
MTTF	Tempo Médio até a Falhas
MTBF	Tempo Médio entre falhas
R	Software usado para cálculos
RMR	Região Metropolitana do Recife
VUE	Vida Útil
VUR	Vida Útil de Referencia

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos	Significado
α	Parâmetro de Escala
C_v	Coefficiente de Variação
d_i	Número de falhas no tempo t_i
Φ	Distribuição acumulada
$f(t)$	Função de Densidade
$F(t)$	Função de Distribuição Acumulada
$g(t)$	Altura dos Saltos do Estimador de Kaplan-Meier
\ln	Logaritmo neperiano
Γ	Função Gama
$h(t)$	Função de Taxa de Falha
n_i	Número de itens sob risco
P	Probabilidade
r	Regressão
$R(t)$	Função de Confiabilidade
$R_{km}(t)$	Estimativa das funções de confiabilidade para o modelo de Kaplan-Meier
$R_{exp}(t)$	Estimativa da função de confiabilidade para o modelo Exponencial
$R_w(t)$	Estimativa da função de confiabilidade para o modelo de Weibull
$R_{ln}(t)$	Estimativa das funções de confiabilidade para o modelo de Log-normal
σ	Desvio padrão
Σ	Soma
t_0	Tempo inicial
t_i	I-ésimo tempo
γ	Parâmetro de Forma
t_p	Percentil
Z	Escore Padrão

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1		Página
1	INTRODUÇÃO	
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivo	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
13	Estrutura da Dissertação	18
 CAPÍTULO 2		
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1	Vida Útil	19
2.1.1	Considerações iniciais	19
2.1.2	Conceito de vida útil nas construções	20
2.1.3	Vida útil física	24
2.1.4	Vida útil econômica	24
2.1.5	Vida útil funcional	25
2.1.6	Fim da vida útil de uma construção	25
2.1.7	Desempenho	27
2.1.8	Planejamento da vida útil (etapas do projeto)	27
2.1.9	Predição da vida útil	29
2.1.10	Etapas no processo de predição	30

2.2	Método dos Fatores para Estimar a Vida útil	30
2.3	Durabilidade do Concreto nas Construções	34
2.3.1	Introdução	34
2.3.2	Importância da durabilidade dos materiais	37
2.3.3	Deterioração do concreto	39
2.3.3.1	Considerações iniciais	39
2.3.3.2	Causas da deterioração do concreto	40
2.3.3.3	Deterioração por desgaste superficial	40
2.3.3.4	Abrasão	40
2.3.3.5	Erosão	41
2.3.3.6	Cavitação	42
2.3.3.7	A água como agente de deterioração	42
2.3.3.8	Deterioração por ação do gelo	42
2.3.3.9	Deterioração por ação do fogo	43
2.3.3.10	Deterioração do concreto por reações químicas ...	46
2.3.3.11	Deterioração da armadura do concreto	47
2.3.3.12	Ação do meio ambiente	47
2.3.3.13	Pasta do cimento	48
2.3.3.14	Componentes do agregado	49

3 CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA

3.1	Importância da análise de Sobrevivência	50
3.2	Confiabilidade	51
3.2.1	Conceito	51
3.3	Tempo de Falha	54
3.3.1	Tipos de falhas	54
3.4	Censura	55.
3.5	Função de confiabilidade	57
3.6	Função de taxa de falha	58
3.6,1	Obtenção dos tempos de falha para estudo	59
3.7	Estimação na ausência de censura	60
3.8	Estimação da função de confiabilidade na presença de censura	63

3.9	Estimador não-paramétrico de Kaplan-Meier	64
3.10	Modelos probabilísticos para o tempo de falha	70
3.10.1	Modelo Exponencial	71
3.10.2	Modelo de Weibull	73
3.10.3	Distribuição Log-normal	87
3.11	Outros Modelos probabilísticos	90
3.12	Escolha do modelo	91
3.13	Comparação do modelo proposto com o de Kaplan-meier ...	92
3.14	Teste de adequação	98

CAPÍTULO 4

4	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	102
4.1	Conclusões	102
4.1.2	Sugestões	103
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
Apêndice A	Cálculos para o teste de adequação para o Modelo Exponencial	106
Apêndice B	Cálculos para o teste de adequação da distribuição de Weibull	108
Apêndice C	Cálculos para o teste de adequação para o modelo log-normal	110
Apêndice D	Valores calculados para a Função de Confiança dos componentes	112
Apêndice E	Determinação de α e γ	113
Apêndice F	Software R	114
Apêndice G	comandos no R	117
Apêndice H	Significado dos comandos do pacote Survival no software R	119

CAPÍTULO 1

1 – INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A preocupação com a segurança, vida útil e durabilidade nas construções tem aumentado bastante em todo mundo, do usuário ao construtor, principalmente no grande Recife, devido a ocorrências verificadas, inclusive com colapso total.

A importância deste trabalho está relacionada à questão do tempo de vida de uma construção ou de sistema construtivo, o que hoje se leva em consideração já na fase de projeto. Neste trabalho são apresentados alguns modelos para estimação do tempo de vida em termos probabilísticos, que são tomados como base para o desenvolvimento da Dissertação.

Nos últimos anos, ocorreram diversos acidentes com edifícios construídos em alvenaria de blocos cerâmico, mas utilizados com finalidade estrutural, e de concreto armado, na Região metropolitana do Recife (RMR) e no Estado de Pernambuco. A prática construtiva local se caracterizava pelo uso dos blocos assentados com os furos na horizontal, resultando numa estrutura que apresenta ruptura brusca e progressivo..

Estes sinistros têm chamado a atenção da comunidade técnica para a necessidade de se estabelecer critérios de projeto de reabilitação que permitam uma intervenção corretiva nestas edificações com níveis de confiabilidade aceitáveis.

Está sendo amplamente divulgado nos meios de comunicação que estima-se que o problema com essas edificações na Região Metropolitana do Recife, atinja aproximadamente 6.000 construções, envolvendo 250.000 pessoas, o que representa cerca de 10% da população.

A grande produção destas edificações deveu-se a algumas vantagens tais como: menor custo em relação às obras com estrutura convencional, o que implicou menores custos de financiamento; rapidez na execução e grande aplicabilidade dos blocos cerâmicos e de concreto produzidos no Estado de Pernambuco.

Por outro lado, a busca pela minimização dos custos, motivada pela perda do poder aquisitivo da população, associada à falta de controle de qualidade sobre a técnica construtiva e a inexistência de norma técnica específica, vem causando, ao longo dos últimos anos, uma série de patologias e acidentes com este tipo de obra, que têm sido amplamente divulgados na imprensa local e nacional.

A frequência destes acidentes tem gerado inquietação à comunidade técnica local e, principalmente, aos moradores destas edificações, que hoje vivem em sobressalto pela incerteza das condições de segurança de suas residências.

Segundo HELENE (2001), tem crescido o número de estruturas de concreto armado com manifestações patológicas, como resultado do envelhecimento precoce das construções existentes. Essas constatações, tanto no âmbito nacional quanto no âmbito internacional, demonstram que as exigências e recomendações existentes nas principais normas de projeto e execução de estruturas de concreto vigentes, até o final do século passado, eram insuficientes.

Quando se objetiva a qualidade das estruturas, é imprescindível a adoção de medidas apropriadas que garantam a sua durabilidade. Muitas destas medidas constituem critérios a serem observados ainda na fase de projeto de uma estrutura.

Na década de 90 do século passado houve um forte movimento para introdução e caracterização do conceito de vida útil no projeto das estruturas de concreto.

Um projeto bem elaborado deve conferir segurança às estruturas e garantir-lhes desempenho satisfatório em serviço, além de aparência aceitável. Portanto, devem ser

observadas as exigências com relação à capacidade resistente, bem como às condições em uso normal e, principalmente, às especificações referentes à durabilidade.

A durabilidade parece ser uma questão muito mais baseada em conhecimento do que em recurso, pois é possível aumentar a vida útil sem aumentar o impacto ambiental durante a fase de produção. A previsão de vida útil implica no conhecimento estimado desta para os componentes e de critérios adicionais de projeto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Investigar o uso de técnicas de Análise de Sobrevivência para estimar a confiabilidade de uma construção ou componentes construtivos, representada pela probabilidade da mesma ou de um componente construtivo estar funcionando a partir de determinado período de tempo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar alguns conceitos, de Análise de Sobrevivência, tais como, o de censura e a taxa de falha, além do Estimador de Kaplan-Meier, os modelos Exponencial, de Weibull e Log-normal, entre outros modelos probabilísticos ;
- investigar as principais características dos modelos usados na confiabilidade:
- estimar o tempo médio de vida útil de uma determinada construção ou de um elemento construtivo, e ainda, a probabilidade dessa construção vir a sobreviver além de um determinado tempo considerado, bem como se estimar o tempo ótimo de manutenção corretiva;

- estimar o tempo de manutenção preventiva ;
- estabelecer dentre um conjunto de modelos probabilísticos investigados, o que melhor se ajuste a um conjunto de dados.

1.3 Estrutura da Dissertação

A Dissertação está apresentada em 4 capítulos, além deste capítulo introdutório. O capítulo dois apresenta a revisão bibliográfica. O terceiro capítulo apresenta a Confiabilidade e Análise de sobrevivência, nas construções. O capítulo quatro apresenta as conclusões e sugestões e o capítulo cinco as referências Bibliográficas.

No capítulo 1, são apresentados a importância e relevância do trabalho, bem como os objetivo geral e os objetivos específicos.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica com enfoque sobre a vida útil das construções, a classificação da vida útil e a durabilidade das construções, dando-se ênfase ao concreto.

No capítulo 3 são apresentados a importância da Análise de sobrevivência, alguns conceitos de tempos de falha e censura, alguns modelos de probabilidades usados na confiabilidade das construções e analisados resultados obtidos com o software R.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vida útil

2.1.1 Considerações iniciais

Por vida útil de um determinado material entende-se o período durante o qual suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos especificados (SOUZA,2005).

Admite-se que um material atingiu o fim da sua vida útil, quando as suas propriedades sob dadas condições de uso, deterioraram a tal ponto que a continuação do uso deste material é considerada como insegura ou anti-econômica. (HELENE,1997)

A definição de vida útil surgiu ao início dos anos 80, diante da necessidade de se estimar desde o projeto, o tempo de vida útil de uma estrutura (MASTERS apud CASTRO, 1998).

O conceito de vida útil é aplicado a sistemas, considerados como um todo, ou às suas partes. Assim, partes das estruturas podem apresentar um valor de vida útil diferente do valor global da estrutura.

A partir do modelo apresentado por (HELENE,1993), no qual propôs uma conceituação e definição objetiva de vida útil, demonstrando a existência de 3 distintas situações e suas correspondentes vidas úteis.

- Vida útil de projeto: é definida como o período de tempo que vai até a despassivação da armadura.
- Vida útil de serviço ou de utilização: é o período de tempo que vai até o momento em que as manchas aparecem na superfície do concreto, ou ocorre o aparecimento de fissuras ou destacamento do concreto.

- Vida útil última ou total: é o período de tempo que vai até a ruptura, ou colapso parcial ou total da estrutura.

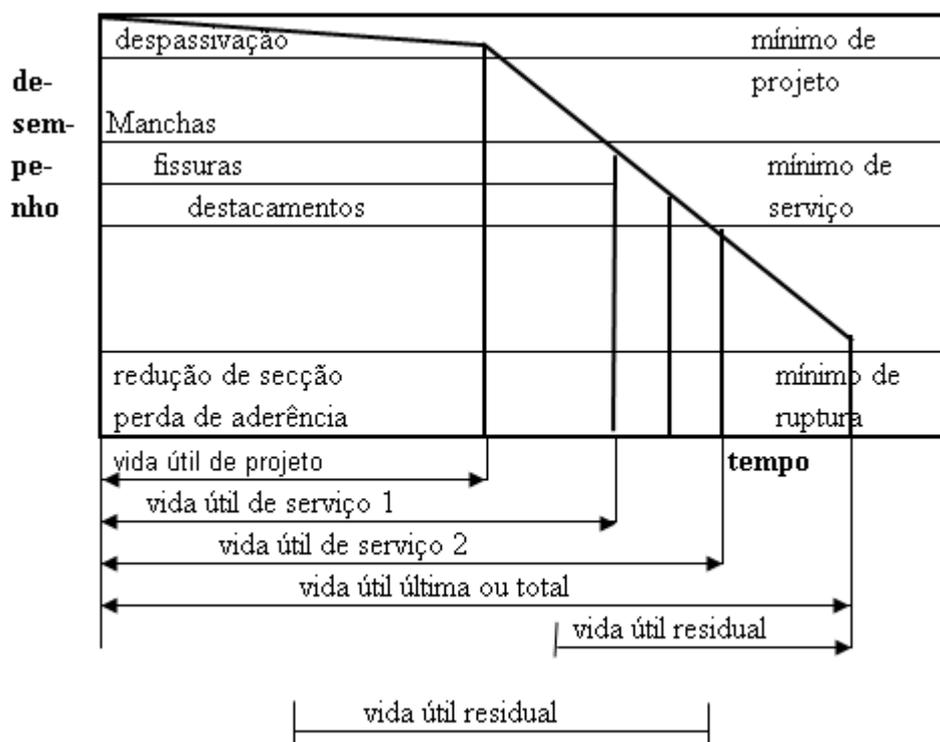


Figura 2. 1 Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referencia o fenômeno da corrosão das armaduras – (HELENE,1993)

2.1.2 Conceito de vida útil nas construções

Mesmo as rochas que têm um alto grau de dureza, formada do magma das profundezas da terra, das lavas dos vulcões, tem sua vida útil na face da terra e depois degradando-se com as interpéries do tempo , transformando-se em pedregulhos ou areia. Da mesma forma todas as construções apresentam um ciclo de vida durante o qual nascem (fases de planejamento, projeto e obra), envelhecem (período de serviço) e morrem (fim de vida útil, correspondendo ao processo de desconstrução).

Nenhum material é inerentemente durável, como um resultado de interações ambientais, a microestrutura e, conseqüentemente as propriedades dos materiais

mudam com o passar do tempo. Admite-se que um material atingiu o fim da sua vida útil, quando as suas propriedades, sob dadas condições de uso, deterioram a um tal ponto que a continuação do uso deste material é considerada como insegura ou anti-econômica (MEHTA,1994).

Durante o período de vida útil, as construções apresentam níveis progressivos de deterioração física, o que contribui para a perda de desempenho, de forma isolada ou combinada, fazem diminuir o seu período previsível de durabilidade.

O presente trabalho procura apresentar alguns conceitos relacionados com a vida útil das construções, distinguindo entre durabilidade, e algumas formas de vida útil.

Todas as construções têm um ciclo de vida durante o qual “nascem”, “envelhecem” e “morrem”, da mesma forma que os seres vivos. Apresentam as mesmas características tais como patologias e riscos de morte.(Gaspar, 2009).

O processo de nascimento corresponde às fases de concepção do projeto, da obra em si e termina com a entrada da entrega do edifício em operação, seja comercial ou residencial.

Para (GASPAR,2009) o processo de envelhecimento das construções inicia-se logo após o início da construção ou da entrega da obra e consiste numa perda gradual, ao longo do tempo, do desempenho, ou seja, da capacidade de os edifícios responderem às necessidades ou requisitos dos usuários. Esta perda é geralmente imperceptível de início, mas manifesta-se em níveis cada vez mais evidentes ao longo do tempo, pela incapacidade dos edifícios em acolherem os usos para os quais foram projetados (ou novos usos, entretanto surgidos) ou pela manifestação de problemas, de avarias ou de falhas - designadas geralmente por patologias.

Durante o período de utilização, que se inicia com a ocupação das construções pelos usuários, estas são ainda sujeitas a diversas mudanças de uso e alterações físicas e espaciais, onde cada um faz suas mudanças convenientes, sem consultar o responsável ou o engenheiro, o que acontece em todos os ciclos econômicos ou classes sociais, e sem o sentimento de que todos os edifícios mudam ao longo da sua vida e que muitos são mesmo profundamente alterados.

A “morte de uma construção” representa o seu limite físico de durabilidade. Quando uma edificação atinge o fim da sua vida, logo inicia-se um processo inverso da construção e, por isso, designado por “desconstrução” - no qual o edifício é desmontado e separado por elementos e componentes ao nível das conexões entre eles, para posterior reaproveitamento, reutilização, reciclagem ou melhor proveito.

Diz-se que uma construção se encontra no seu “período de vida útil” enquanto for capaz de responder às necessidades objetivas e subjetivas do utilizador, dentro de limites considerados aceitáveis de custo (de manutenção e de gestão) e sem prejuízos para terceiros (ou custos indiretos), (GASPAR ,2009).

Apesar da relativa simplicidade do conceito, a vida útil é extremamente difícil de prever ou simular através de modelos, pois, depende da definição de critérios de aceitação, variáveis em função da época, do lugar, do avaliador e, de fato, de todo o contexto social, econômico, político, estético, ambiental ou normativo que enquadra o julgamento sobre a construção. Esta idéia pode ser compreendida se se considerar, por exemplo, que a acessibilidade para o conforto acústico, que alteram, significativamente, a avaliação que se faz das construções existentes.

Até aqui, referiu-se à vida útil das construções como um conceito holístico, isto é, relativo à totalidade do edifício. Na realidade, porém, verifica-se que as construções raramente envelhecem como um todo homogêneo, pelo que o estudo das mudanças, transformações e degradação destas é geralmente feito ao nível das mudanças, transformações e degradação dos sistemas ou elementos que compõem as edificações. Por outro lado, diferentes construções envelhecem de modos igualmente distintos pelo que, nos estudos sobre o tema, em vez de uma vida útil para as construções, referem-se geralmente distintas vidas úteis, de acordo com os usos que estão associados aos edifícios.(GASPAR ,2009).

Tendo em conta a complexidade do comportamento das construções, ao longo do tempo, e a relatividade do conceito de vida útil, a maioria dos estudos sobre a durabilidade das construções adapta um método analítico, segundo o qual o problema

é subdividido e analisado de acordo com as seguintes categorias diferenciadas:
(GASPAR,2009)

- a) deterioração física;
- b) desempenho econômico;
- c) obsolescência funcional;
- d) obsolescência tecnológica;
- e) alterações do contexto social;
- f) mudanças do contexto envolvente;
- g) alterações normativas;
- h) degradação estética
- i) alterações ambientais

Estas subdivisões podem ser resumidas em três principais grupos de fatores:
(GASPAR, 2009)

- a) desempenho econômico;
- b) obsolescência funcional e de imagem;
- c) vida útil física

2.1.3 Vida útil física

A vida útil física corresponde ao período de tempo durante o qual o edifício ou parte dele se mantém num nível requerido de adequação às exigências que lhe são colocadas ou que permita acolher e responder a novos usos, sem sofrer desgaste físico irreversível para além de uma manutenção corrente ou de investimentos equivalentes ao custo de reposição do elemento. O fim da vida útil física de um material ou componente corresponde ao limite teórico da durabilidade por motivos de deterioração física, devido ao desgaste decorrente do uso, a ações ambientais (num cenário de manutenção corrente) ou a degradação por negligência (em cenários de ausência de manutenção).

2.1.4 Vida útil econômica

Ainda que um edifício mantenha a sua integridade física (acima dos níveis mínimos de desempenho), por vezes sucede ser economicamente inviável a sua manutenção, por exemplo pela insuficiência dos rendimentos gerados ou pela existência de alternativas mais rentáveis de ocupação do espaço associado à construção. Neste contexto, a vida útil econômica define-se como o período de tempo que decorre: a) até que uma construção seja substituída por outra ou por uma atividade mais rentável; b) enquanto mantiver uma relação de custo / benefício anual inferior às alternativas; ou c) muito simplesmente, até ao abandono da construção .

Diversos autores enfatizam a importância da compreensão e da quantificação dos custos associados à vida útil de um edifício, por via direta ou indireta . Os custos diretos durante a fase de exploração podem variar desde 80% até mais de 300% dos custos globais da construção . Os custos indiretos estão geralmente associados ao impacto da construção, no ambiente (poluição atmosférica, produção de lixo ou consumo de recursos naturais, por exemplo) ou na saúde dos usuários (por exemplo, através da utilização de materiais ou tecnologias, tais como o uso de

amianto ou chumbo na construção, ou a existência de sistemas de ventilação considerados deficientes)

2.1.5 Vida útil funcional (obsolescência)

A vida útil funcional corresponde ao período de tempo durante o qual uma construção suporta uma utilização, independentemente do fim para que foi concebida, sem obrigar a alterações generalizadas, (GASPAR, 2009)

Este conceito ultrapassa uma natureza meramente programática, dado que atualmente se entende a adequação ao uso como uma resposta global às expectativas dos usuários (incluindo a funcionalidade estrita, a flexibilidade intrínseca ao edifício, mas também dimensões de conforto, de moda ou de significado da arquitetura).

A vida útil funcional está diretamente ligada à noção de obsolescência (do edifício ou das suas partes), entendida como uma perda de desempenho destes, não por incapacidade de responderem às exigências para as quais foram originalmente concebidos, mas por não acompanharem a evolução das exigências dos usuários - um pouco à semelhança do que sucede no domínio das aplicações informáticas.

2.1.6 Fim da vida útil de uma construção

O fim da vida útil de uma construção representa o ponto no tempo em que esta deixa de poder assegurar as atividades que nela se desenvolvem, por fatores nem sempre objetivos e quantificáveis. Por simplificação, geralmente, considera-se que uma construção atinge o seu fim de vida quando uma das suas dimensões de análise atinge um limite crítico inaceitável, por obsolescência funcional, falta de rentabilidade económica ou pela degradação física das suas partes no contexto de uma manutenção corrente.

A figura 2.2 – ilustra graficamente este processo, através da comparação de diferentes exigências de uma construção e, simultaneamente, pela indicação dos níveis mínimos de aceitação para cada uma delas . No exemplo apresentado, a degradação estética é a propriedade que mais cedo atinge o seu mínimo admissível, pelo que se assume como condicionante da vida

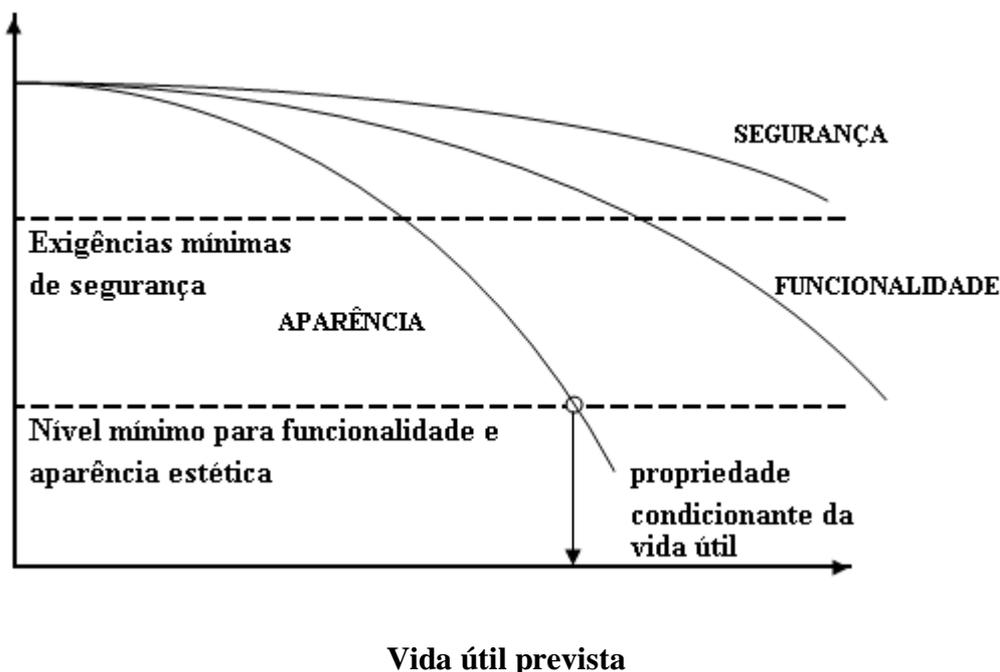


Figura 2.2 – Relação entre a perda de desempenho das propriedades de um elemento e os mínimos aceitáveis, identificando aquela que condiciona a vida útil da construção.(GASPAR e BRITO,2009)

Atualmente, considera-se que um edifício se mantém em serviço enquanto fornecer resposta às necessidades e expectativas dos usuários, mantendo a sua durabilidade física.

Daqui decorre que, mais do que falar em “vida útil” das construções, importa estudar as diferentes vidas úteis daquelas (dos pontos de vista físico, econômico e funcional)

Infelizmente, existe ainda uma grande distância entre o entendimento conceitual dos processos de envelhecimento e de fim de vida de uma construção e a definição de

instrumentos que modelem a perda de desempenho de cada uma das dimensões consideradas. A título de exemplo, considere-se a enorme dificuldade associada à definição dos níveis mínimos aceitáveis de desempenho pois, mesmo que as construções mantenham um nível constante de resposta a determinadas exigências, a própria noção do que é o mais adequado ou desejável num dado momento e local está em permanente mutação e sujeito a uma forte componente subjetiva (associada a aspectos de adequação programática ou de gosto) que se sobrepõem inclusivamente a critérios de racionalidade técnica e econômica .

2.1.7 Desempenho

Por desempenho entende-se o comportamento em serviço de cada produto, ao longo da vida útil, a sua medida espalhará, sempre o resultado do trabalho desenvolvido nas etapas do projeto, construção e manutenção (SOUZA, 2005). Para diminuir futuras patologias dois procedimentos deviam ser realizados por empresas de auditoria terceirizada que serveriam como interface entre construtora e consumidor:

- 1 – analisar a viabilidade dos projetos de fundação, estrutura, saneamento, etc., focalizando sempre a segurança, higiene e a durabilidade;
- 2 - acompanhar a execução dos projetos priorizando, sempre a qualidade dos serviços e dos materiais empregados;

2.1.8 Planejamento da vida útil (etapas no projeto)

O objetivo do planejamento da vida útil, é assegurar que a vida útil estimada da construção ou componente construtivo alcançará, no mínimo, a vida útil de projeto. A extensão da vida útil não pode ser conhecida, antecipadamente, com precisão, o objetivo passa então a ser: fazer uma previsão confiável apropriada da vida útil usando dados disponíveis. Como para alcançar esse objetivo, pode-se, exigir

manutenção durante a vida útil da construção ou componente. A estimativa da vida útil na fase de projeto, permite obter considerações do local específico. Ajudará o planejamento das operações de manutenção futura, seleção da melhor especificação de projeto e rejeição de desperdícios. (ZARZAR, 2007)

No processo de planejamento da vida útil de uma construção ou componente construtivo, algumas etapas são importantes, as quais são relacionadas a seguir: (ZARZAR,2007)

- Instrução (decisões que são tomadas na fase inicial do projeto: assegurar que a vida útil, não será menor que a vida útil de projeto, componentes da construção, etc.) ;
- projeto inicial e conceitual (orçamento, tempo de construção, manutenção, etc.);
- projeto detalhado (detalhamento seleção de materiais e componentes, meio ambiente, mão de obra, etc.) ;
- especificação (seleção de materiais e componentes) ;
- local de trabalho (condições locais, meio ambiente, defeitos referente a mão-de-obra, reduzir riscos, etc.) ;
- caracterização do meio ambiente (nível dos agentes de degradação, lençol freático, poluição, cloretos, etc.) ;
- estimativa de custos (o projeto deve refletir todas as restrições orçamentárias para satisfazerem as exigências da vida útil) ;
- plano de manutenção (programa para reposição de componentes) ;
- exigências de desempenho e aceitação (vidas úteis mínimas para materiais e componentes) ;
- predição da vida útil (estabelecer confiabilidade adequada).

2.1.9 Predição da vida útil

O objetivo de prever a vida útil de uma construção ou de um componente construtivo é estabelecer, com confiabilidade adequada, se a vida útil pode exceder a vida requerida pelo projeto (ZARZAR,2007). Prognósticos da vida útil deveriam:

- estabelecer confiabilidade adequada;
- reduzir incertezas;
- buscar usar dados disponíveis de qualidade conhecida;
- ser usados como guia e não por imposição;
- precisão e confiabilidade do método;
- precisão e confiabilidade do método;
- considerações inerentes que influem no processo de predição;
- abordagem dos assuntos relevantes;
- efeitos da exposição e variações das intensidades;
- tipos de dados usados para predição;
- dados relevantes;
- comparações;
- experiência;
- estimativas;
- série histórica;
- clima;
- partículas poluentes, etc.

2.1.10 Etapas no processo da predição

De acordo com a ISSO 15686-1, o processo de predição envolve análise do problema em questão, o agrupamento de informações relevantes e conhecimento, assim como o uso de ensaios e comparação da exposição e avaliação de dados. A seguir são tratados na ISSO 1686-2 e deve ser usada como orientação adequada e atualizada:

- definição do problema (o primeiro passo é analisar o problema, identificar todos os fatores relevantes e obter dados como segurança, durabilidade, economia, etc.)
- preparação (identificar causador de degradação: mecânico, químico ou biológico)
- pré-ensaios (expor os itens em a uma ação extrema ou mais rápida aos agentes de degradação para fornecer um melhor entendimento dos efeitos da variação das exposições, intensidades e a combinação de agentes)
- exposição e avaliação (observar e medir a degradação de longa duração em situações de uso e situações de exposição planejada, a fim de acelerar os efeitos dos agentes)

2.2 Método dos Fatores para Estimar a Vida Útil

Existem métodos usados para a estimativa de vida útil das construções que incluem estimativas baseadas em experiências , deduções de desempenho de materiais, resultados de testes acelerados, na aplicação de confiabilidade e de processos estocásticos. Esses métodos encaram apenas os processos de degradação. Construções consideradas novas ou recém construídas onde fatores ambientais e cargas não foram bem definidas, se tornam bastante difícil de se avaliar.

As aplicações da teoria das probabilidades se mostram promissoras nesse sentido, pois são ferramentas úteis para a resolução desse tipo de problema, o qual envolve questões ambientais e fenômenos aleatórios, cujas variáveis envolvidas não podem ser tratadas como constantes no tempo.

Na utilização dos métodos probabilísticos os pesquisadores aplicam a teoria da confiabilidade para predizerem como se comportará uma determinada construção,

levando em consideração a ação de variáveis aleatórias que interferem durante a sua vida útil.

Na realização de uma análise probabilística, é importante que seja definido o índice de confiabilidade associado a uma probabilidade de falha, a qual deve ser a menor possível, considerando os níveis de desempenho da estrutura.

A ISO 15.686-1 que lida com assuntos e dados necessários para prever a vida útil, apresenta uma metodologia para prognosticar a vida útil e, conseqüentemente, estimar o tempo certo de manutenção necessária e substituição dos componentes e tem, como objetivo, garantir que a vida útil de serviço seja maior do que a vida útil de projeto. É baseado na vida útil de referência (VUR), e uma serie de fatores variáveis que se comportam a situação específica de um caso.

Tabela 2.1 – Normas ISO 15686 interligada com Método dos Fatores

ISO 15686-1	Trata dos princípios gerais e dados necessários para estimar a vida útil de componentes construtivos e apresenta um método (Método dos Fatores) , para uso em projetos.
ISO 15686-2	Descreve uma metodologia para testar o desempenho ao longo do tempo
ISO 15686-3	Descreve o enfoque e os procedimentos a serem aplicados na instrução do projeto para alcançarem que o desempenho desejado ao longo do tempo sejam executados
ISO 15686-4	Descreve a gama de dados de desempenho que permitirá a determinação da vida útil
ISO 15686-5	Proporciona diretriz para a avaliação dos custo de vida de uma construção
ISO 15686-6	Descreve os procedimentos que devem ser considerados sobre impactos ambientais
ISO 15686-7	Refere-se a análise de desempenho e “feedback” de dados de vida útil na prática
ISO 15686-8	Refere-se a vida útil de referência e estimativa da vida útil projeto de norma-Draft)

O Método dos Fatores utiliza sete fatores (ZARZAR, Jr., 2007). Que são:

Fator A: qualidade do componente

Fator B: nível do projeto

Fator C: Nível de execução do projeto

Fator D: Ambiente interno

Fator E: Ambiente externo

Fator F: condições de uso

Fator G: nível de manutenção

Qualquer desses fatores ou combinações de variáveis podem afetar a vida útil.

O Método dos Fatores pode ser expresso, por uma família:

$$VUE = VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G \quad (2.10)$$

Onde: VUE = Vida útil estimada

VUR = Vida útil de referência dos componentes

Esses fatores têm pesos: 0,8 ; 1,0 e 1,2 , que são atribuídos por um grupo de especialistas na área, onde todos deverão ter o mesmo consenso sobre os pesos dados.

Sendo: Ruim = 0,8 Normal = 1,0 e Muito Bom = 1,2

Para 2 fatores, por exemplo E e G, a estimativa de vida útil é:

$$VUE = VUR \times E \times G .$$

A estimativa do Intervalo de confiança de VUR e dos fatores E e G, são; ΔVUR , ΔE e ΔG .

O intervalo de confiança do VUE, é dado pela expressão:

$$\Delta VUE = \pm VUE \times \sqrt{\left(\frac{\Delta VUR}{VUR}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2}, \quad (2.1)$$

considerando ainda que $1-\alpha = 95\%$ (nível de confiança). (ISO/DIS 15686-8; 2006).

Para estimar a vida útil de um determinado componente, atribuindo valores aleatórios para os pesos:

Classe de fatores	Característica do fator	Valor do fator
A	Qualidade do componente	1,2
B	Nível do projeto	1,2
C	Nível de execução do trabalho	1,2
D	Ambulante interno	1,0
E	Ambiente externo	1,2
F	Condição de uso	1,0
G	Nível de manutenção	1,2

Logo, $VUE = VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$

$$VUE = VUR \times 1,2 \times 1,2 \times 1,2 \times 1,0 \times 1,2 \times 1,0 \times 1,2 = 2,5 VUR \text{ anos}$$

Se VUR for equivalente a 25 anos, então, o valor da vida útil do VUE é aproximadamente 62 anos.

Outro exemplo:

Calculo da estimativa da vida útil de uma verga de concreto, levando em consideração o intervalo de confiança de 5 anos.

Assume que é de 50 ± 5 anos (intervalo de confiança de 10% proposto pela ISO/DIS 15686-8 ; 2006)

O valor dos fatores são; 0,8 ; 1,0 ; 1,2

Assume-se que o intervalo de confiança de cada fator está entre $\pm 10\%$ do seu valor, respectivamente.

Portanto, um fator 1,2 terá um intervalo de confiança de $\pm 0,12$. Os valores aleatórios foram obtidos na tabela a seguir;

Classe de fatores	Valores
A	1,0
B	1,0
C	1,0
D	0,8
E	0,8
F	1,0
G	1,0

Temos:

$$VUE = VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$$

Considerando que a VUR = 50 anos

$$VUE = 50 (1 \times 1 \times 1 \times 0,8 \times 0,8 \times 1 \times 1) = 32 \text{ anos}$$

ΔVUE = intervalo de confiança

ΔVUR = 10% da VUR, dividido pelo valor da VUR

ΔA = 10% do valor do fator A, dividido pelo respectivo valor do fator A

$$\Delta VUE = \pm VUE \times \sqrt{\left(\frac{\Delta VUR}{VUR}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2} =$$

$$= \pm 32 \times \sqrt{\left(\frac{5}{50}\right)^2 + 7(0,1)^2} = 9,05 \text{ anos}$$

Logo, a estimativa para o intervalo de confiança do VUE = 32 ± 9,05 anos

A estimativa de VUE é: $VUE \pm \Delta VUE$ (2.3)

2.3 Durabilidade do concreto nas construções

2.3.1 – Introdução

Historicamente, o concreto armado, apesar de ter sido descoberto na metade do século XIX, seu uso foi disseminado pelo mundo a partir do início do século XX. Pelas suas qualidades, rapidamente tornou-se o material de construção mais utilizado pelo homem, sobrepujando o aço, o tijolo cerâmico e a madeira.

Percebeu-se em princípio, que, diferentemente das estruturas de aço, a armadura no interior do concreto estava protegida da corrosão, mesmo em ambientes externos e agressivos, resultando nas qualidades da durabilidade desse material

O concreto armado atendeu prontamente às enormes necessidades de construção pós-guerra. Foram desenvolvidos novos sistemas construtivos e modelos de cálculos que permitiram maior produtividade e menores custos, fatores essenciais para a construção. Porém, com essas inovações, aumentaram a esbeltez das estruturas, reduzindo as dimensões das peças estruturais e o cobrimento das armaduras e incrementando as tensões de trabalho. Essas mudanças tiveram um reflexo direto sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado, favorecendo a tendência para fissuração e reduzindo a proteção das armaduras..

A partir da segunda metade do século XX, a indústria da Construção Civil começou a se confrontar com o aumento vertiginoso dos danos causados pela deterioração das estruturas de concreto e os enormes custos envolvidos para repará-las. Essa situação exigiu estudos para conhecimento dos principais mecanismos de deterioração e a inclusão de normas relativas às estruturas de concreto, de parâmetros de projetos, voltados especificamente para a durabilidade.

No Brasil, essa consciência tomou impulso a partir da década de 90, com o crescente número de estruturas deterioradas e com a formação de pesquisadores e núcleos de pesquisa na área de durabilidade das estruturas de concreto. Um grande avanço foi dado com a revisão da NBR 6118 (ABNT, 2003) a qual contempla capítulos relativos à durabilidade.

As estruturas de concreto, devem ter vida longa para que se diminuam os gastos com manutenções e reparos. Apesar do concreto possuir excelente durabilidade, inevitavelmente, a estrutura perderá essa característica ao longo do tempo, pela forte interação existente com o meio ambiente.

Para (NEVILLE, 1997), durabilidade do concreto não significa vida indefinida, nem significa suportar qualquer tipo de ação. É necessária uma manutenção de rotina. Para muitas condições de exposição das estruturas do concreto, tanto a resistência como a durabilidade devem ser consideradas de forma bem clara na fase do projeto.

Para (PETRUCCI, 1970), uma das principais defesas do concreto é a sua compacidade. Logo a fissuração será um caminho aberto à agressão.

Vale salientar que o uso de um concreto “durável” não confere necessariamente durabilidade à estrutura. A característica do concreto, apesar de importante, é apenas um dos parâmetros que influencia a durabilidade, dentre os quais pode-se destacar detalhes arquitetônicos, deformabilidade da estrutura, cobrimento das armaduras, etc.

Para (GARJA & VISIKARI, 1996), o termo durabilidade pode ser definido como a capacidade de um edifício, componente ou estrutura, manter um desempenho mínimo, em um determinado tempo, sob a influencia de agentes agressivos.

Uma longa vida é considerada sinônimo de durabilidade (MEHTA1996). O comitê 201 do ACT, define durabilidade do concreto de cimento Portland como a capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, ou seja, o concreto durável conserva sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao meio ambiente.

Especificamente para o material concreto, ACI 201.2R (ACI,2001), conceitua como durável aquele que possui capacidade de resistir ao intemperismo, ataque químico, desgaste por abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, retendo a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização, quando exposto ao ambiente de trabalho.

Nenhum material é inerentemente durável, como um resultado de interações ambientais, a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades dos materiais mudam com o passar do tempo. Admite-se que um material atingiu o fim da sua vida

útil, quando as suas propriedades, sob dadas condições de uso, deterioram a um tal ponto que a continuação do uso deste material é considerada como insegura ou anti-econômica (MEHTA,1994).

A NBR 6118 / 2003), apesar de afirmar que a estrutura de concreto deve manter sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço, durante o período correspondente à sua vida útil, não especifica qual deverá ser essa vida útil. O fator tempo na abordagem da durabilidade do concreto, ou das estruturas de concreto, é função da complexidade dos mecanismos de deterioração envolvidos.

Assim, para se afirmar que um concreto é durável, seria necessário ter definido o desempenho mínimo desejado para o material, em um determinado intervalo de tempo que se deseja alcançar, dentro de um meio ambiente que sempre interage com a estrutura do concreto armado.

Como sinônimo de durabilidade, as pirâmides do Egito, foram construídas a centenas de anos e ate hoje resistem as interpéries do tempo.



Figura 2.3 – Pirâmides do Egito - Fonte: www.google.com.br

2.3.2 Importância da durabilidade dos materiais

Hoje em dia é usualmente aceito que, ao projetarem-se estruturas, as características de durabilidade dos materiais em questão devam ser avaliadas com o mesmo cuidado que

outros aspectos, tais como propriedades mecânicas e custo inicial. Em primeiro lugar há uma melhor avaliação das implicações sócio-econômicas da durabilidade. De modo crescentes os custos de reparos e substituições em estruturas devido a falha dos materiais têm se tornado parte substancial do orçamento total da construções . O crescimento no custo de reposição das estruturas é a ênfase crescente no custo do ciclo de vida ao invés do custo inicial , estão forçando os construtores e engenheiros a tomarem consciência dos aspectos de durabilidade. Além disso, há uma compreensão que existe uma estreita relação entre durabilidade e de materiais e ecologia.

A conservação dos recursos materiais através da produção de materiais mais duráveis, além de tudo, um passo ecológico. Também, os usos do concreto estão sendo estendidos a ambiente cada vez mais hostis tais como plataformas marítimas, recipientes para gases liquefeitos a altas temperaturas e câmeras de reação de alta pressão na indústria nuclear. Os custos econômicos e humanos devido a colapsos e falhas prematuras e repentinas do material de construção pode ser muito alto.

Os consumidores da Construção Civil, públicos e privados, têm sofrido com a falta de durabilidade das estruturas de concreto armado. Edifícios comerciais e residenciais, de pequeno e grande porte, pontes viadutos, túneis, obras hidráulicas, no país e em todo o mundo, com alguns anos de vida, podem apresentar manifestações patológicas relacionadas com uma ou mais formas de deterioração do concreto.

Não existe no Brasil uma estimativa das manifestações patológicas existentes nas pontes e viadutos por exemplo, e se tivesse, os resultados não seriam animadores.

As pontes municipais do Recife podem ser um bom exemplo da importância dessas obras de arte (pontes e viadutos). A cidade é cortada por cinco rios e 105 quilômetros de canais, necessitando de um conjunto de pontes para o deslocamento da população. Das vinte e sete pontes existentes, é provável constatação de patologias. (ANDRADE,2005), um dos casos mais graves encontrava-se em uma das pontes com um grande fluxo de tráfego, onde foram detectadas manifestações em 16 blocos de fundações, originadas inicialmente por forte reação álcali-agregado, induzindo um

intenso quadro de fissuração, que abriu caminho para atuação de outros mecanismos de deterioração, como: corrosão nas armaduras, lixiviação e ataques de sulfatos. (HELENE,2002).

Estruturas portuárias e estádios de futebol também são alvos dessas manifestações. No caso de estádios, muitas vezes há a necessidade de interdita-los, total ou parcialmente, por problemas relativos a segurança estrutural.

O problema não é relativo às patologias em si, pois elas são inevitáveis com o envelhecimento das estruturas, mas a idade em que estão surgindo. Muitas vezes, estruturas com menos de 20 anos já necessitam de manutenções corretivas para prolongar sua vida útil.

Para ANDRADE, 2005, Uma importância mais ampla da durabilidade das estruturas e bastante atual, esta na economia de recursos naturais, á medida que se prolonga o ciclo de vida das edificações, permitindo um menor impacto sobre o meio ambiente.

2.3.3 Deterioração do concreto

2.3.3.1 Considerações iniciais

Algumas observações são importantes na durabilidade do concreto. A água, agente primário, tanto na criação quanto na destruição de muitos materiais na natureza, é o fator central para a maioria dos problemas de durabilidade do concreto. A água em materiais porosos, é a causa de muitos tipos de processos físicos de degradação. Como veículo de transporte, de íons agressivos, a água também pode ser uma fonte de processos químicos de degradação. Portanto, águas ácidas tendem a ser particularmente prejudiciais ao concreto.

A deterioração do concreto raramente é devida a uma causa única. Geralmente em estágios avançados da degradação do material, mais de um processo deletério está em

ação. Em geral, as causas físicas e químicas da deterioração estão tão proximamente entrelaçadas, que até mesmo a separação entre causa e efeito frequentemente se torna impossível.

2.3.3.2 Causas da deterioração do concreto

O concreto armado possui excelente durabilidade. Essa é uma das qualidades que levam a ser o material mais intensamente utilizado no mundo. Apesar da qualidade, agentes naturais interagem, provocando o envelhecimento, isto é, a perda progressiva do desempenho estético, funcional, ou em caso mais grave, estrutural. As causas da deterioração do concreto são consequências da ação desses agentes.

As causas da deterioração do concreto armado induzidas, podem ser extremamente complexas, envolvendo diversas ações mecânicas, físicas, químicas, físico-químicas e até biológicas, que atuam de forma simultânea e progressiva, principalmente em meios agressivos, influenciando na cinergia e cada mecanismo e tornando difícil a determinação da contribuição das diversas causas atuantes.

2.3.3.3 Deterioração por desgaste superficial

O desgaste superficial pode ser originado por efeito de abrasão (geralmente em pisos e pavimentos), erosão e cavitação (em obras hidráulicas ou estruturas que estejam em contatos com fluidos em movimento) Mehta, 1994.

2.3.3.4 Abrasão

O desgaste por abrasão não está associado à perda de desempenho mecânico da estrutura ou do elemento de concreto, mas sim, à perda de desempenho quanto à sua funcionalidade.

A origem do problema se dá pelo mecanismo de fricção ou atrito, a seco, que tem como agente qualquer material abrasivo, proveniente do tráfego de pessoas, veículos, ou até mesmo pela ação do vento, provocando perda de material e geração de pó.

A resistência ao desgaste do concreto por abrasão está integralmente associada à qualidade da camada superficial. Portanto, a resistência da superfície deve ser maximizada por meio do emprego de uma pasta de cimento e de um agregado que permitam resistir às solicitações de desgaste. Quanto maior for a dureza e menor a porosidade da pasta, maior será a sua resistência à abrasão. Essas características são obtidas com a redução da relação água/cimento. Isto é, com o incremento da resistência à compressão do concreto.

Para se melhorar a resistência á abrasão das superfícies de concreto, deve-se evitar no máximo a segregação e exudação, empregando dosagem bem proporcionada e utilizando abatimento o mais baixo possível. (ANDRADE,2005).

2.3.3.5 Erosão

Quando o desgaste por abrasão tem origem pela ação da água em movimento que arrasta partículas sólidas em suspensão como areia, cascalho, pedra e outros objetos, o fenômeno é denominado de erosão. Essas partículas chocam-se contra a superfície do concreto, provocando desgaste por colisão, escorregamento ou rolagem.

O desgaste por erosão possui os mesmos princípios básicos citados para o de abrasão. As solicitações podem ser muito severas, dependendo da velocidade da água e da quantidade, forma , dureza e massa específica das partículas transportadas, bem como da qualidade do concreto.

2.3.3.6 Cavitação

Os desgastes superficiais por cavitação são danos causados na superfície sólida de um material, originado pelo colapso de bolhas de vapor que se deslocam no interior de um fluxo de água, que foram formadas em regiões de baixa pressão.

A cavitação, portanto, é uma ação de desgaste superficial que pode ser de extrema severidade e nem sempre concretos resistentes possuem capacidade de resistir a tal fenômeno. As estruturas de concreto sujeitas á cavitação são aquelas que estão em contato com fluxo de água com elevada velocidade.

Apesar de a cavitação poder ser combatida com o uso de concretos dosados para tal solicitação, a solução será a redução ou eliminação das causas, que poderá ter um custo elevado, sendo mais viável o reparadas regiões danificadas.

2.3.3.7 A água como agente de deterioração

O concreto não é o único material vulnerável aos processos físicos e químicos de deterioração associados à água. Sendo pequenas, as moléculas de água são capazes de penetrar em cavidades ou poros extremamente finos. Como solvente, a água é notável pela sua habilidade de dissolver mais substância do que qualquer outro líquido conhecido, como também tem a maior temperatura de evaporação entre os líquidos comuns. (LIMA, 2005).

2.3.3.8 Deterioração por ação do gelo

O congelamento da água no concreto é um mecanismo de deterioração que ocorre, exclusivamente, em países de clima frio, onde existem ciclos freqüentes de congelamentos e degelo. Apesar da grande extensão territorial brasileira, não existem regiões onde se observe tal fenômeno em intensidade.

Todo concreto é permeável, pois tanto a pasta de cimento endurecida quanto os agregados possuem uma rede de capilares que se comunicam entre si e com o meio externo. Esses capilares permitem a entrada de água, durante as estações chuvosas, a qual é passível de se congelar nas estações frias do ano.

Os danos causados podem ser no agregado ou na pasta de cimento endurecida ou em ambos. Os danos são gerados pela excessiva pressão interna desenvolvida durante o congelamento da água.

A água sempre presente no sistema de poros capilares do concreto, congela em seu interior, aumentando seu volume. Caso não exista espaço suficiente para acomodar esse volume, a água forçará as paredes dos poros capilares, induzindo tensões de tração e, conseqüentemente expansão. Ciclos de congelamento e degelo, ao longo dos anos, provocarão o colapso progressivo da peça, devido a fissuras, geradas pela pressão interna.

2.3.3.9 Deterioração pela ação do fogo

Apesar das estruturas de concreto armado possuírem uma excelente resistência à ação do fogo, nem sempre resistem aos danos provocados. (ANDRADE,2005)

Nos últimos anos, as estruturas de concreto vêm se tornando mais esbeltas, pela evolução dos conceitos de cálculos e, principalmente, pelo aumento da resistência à compressão do concreto.

Diferentemente das estruturas metálicas, as estruturas de concreto armado possuem excelente resistência ao fogo, sem que haja a necessidade de proteção auxiliar com barreiras de isolamento térmico, tão usual nas estruturas de aço.

A resistência é devida a propriedade de baixa condutividade térmica do concreto, e aliada a essa baixa condutividade, as estruturas de concreto armado também possuem

menor fator de massividade, que é a relação entre a área do elemento estrutural exposto ao fogo e o seu volume total (NBR14.432 / 2000). Quanto mais esbelto o elemento estrutural, maior o fator massividade e, proporcionalmente, maior a área da secção transversal a ser afetada, para um mesmo intervalo de tempo de exposição ao fogo. Com o tempo de exposição, o processo de degradação é inevitável e crescente, ocorrendo perda da capacidade resistente e redução da rigidez dos elementos da estrutura.

Durante o aquecimento do concreto, inicialmente, ocorre a vaporização gradativa da água livre nos poros capilares maiores e, posteriormente a água absorvida, existentes nos poros e gel (Mehta & Monteiro, 1994).

Uma das causas do colapso das Torres do Trade Word Center foi a ação do calor.



Figura 2. 4 – Colapso das Torres do Trade Word Center

Fonte: www.google.com.br

Pela vaporização da água do concreto, pressões surgem em seu interior, pois o vapor d'água, formado nos poros, não consegue migrar e sair do concreto com a mesma

velocidade com que foram formados. Além da pressão de vapor tensões térmicas se desenvolvem entre a pasta do cimento e os agregados, em consequência dos coeficientes de dilatação térmica bastante diferenciados dos dois componentes. Durante o aquecimento, enquanto a pasta de cimento se contrai, devido a secagem e a desidratação dos compostos, os agregados se expandem, induzindo deformações diferenciais.

Os agregados possuem forte influência no comportamento mecânico do concreto e temperaturas elevadas. A porosidade e mineralogia dos agregados são os principais fatores de influência (Mehta & Monteiro, 1994)

As tensões térmicas também são geradas pelos gradientes de temperatura, existentes entre as diversas camadas da secção do concreto. A magnitude dessas tensões é proporcional á taxa de aquecimento e á condutividade térmica do concreto. Essas tensões induzem a um nível de fissuração crescente na matriz com elevação de temperatura, reduzindo, de forma progressiva , as propriedades mecânicas do concreto.

Uma outra forma de degradação do concreto, so a ação de altas temperaturas, está associada ao desprendimento da sua camada superficial, denominado de lascamento ou “spalling”. Inúmeros outros fatores podem influenciar para a ocorrência desse fenômeno, no entanto, o teor de umidade e a permeabilidade da pasta de cimento, são os fatores preponderantes.

As ações de combate a um incêndio, inevitavelmente, levam a um resfriamento brusco da estrutura, induzindo maiores gradiente térmicos entre a superfície e o núcleo, gerando quedas maiores nas superfícies mecânicas do concreto..

A segurança humana, na ocorrência de fogo, e uma das considerações no projeto em qualquer tipo de edificação. Ao contrário da madeira e plásticos, o concreto é incombustível e não emite gases tóxicos quando expostos a alta temperatura. O

concreto é capaz de manter a resistência suficiente por períodos relativamente longos, permitindo assim operações de resgate pela redução de risco de colapso estrutural. .

2.3.3.10 Deterioração do concreto por reações químicas

Segundo (MEHTA & MONTEIRO, 1994), a resistência do concreto a processos destrutivos iniciados por reações químicas, envolve geralmente, mas não necessariamente, interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio ambiente e os constituintes da pasta de cimento.

Entre estas reações estão as reações álcali-agregados que ocorrem entre os álcalis da pasta de cimento e certos minerais reativos quando presentes no agregado, hidratação retardada do CaO e MgO cristalinos, se presentes em quantidades excessivas no cimento Portland e corrosão eletroquímicas da armadura no concreto.

Para (NEVILLE,1997), o concreto geralmente resiste bem a ataque químico, desde que usada uma mistura apropriada e o concreto seja bem adensado. Em geral, o ataque químico do concreto ocorre pela decomposição de produtos da hidratação e formação de outros produtos que, se forem solúveis podem se expandir no próprio local onde se formam.

Para (PETRUCCI,1970), o concreto é atacado por diversos agentes agressivos, mas que umas das principais defesas do concreto é a compacidade. Logo, a fissuração é o caminho aberto à agressão.

Os processos dos quais se pode lançar mão para atenuar ou impedir a agressividade são: a escolha adequada do aglomerante, elaboração cuidadosa do concreto, bom adensamento, cura eficiente, proteção superficial do concreto e tratamentos químicos.

:

2.3.3.11 Corrosão da armadura do concreto

O dano ao concreto resultante da corrosão da armadura manifesta-se sob a forma de

- expansão
- fissuração
- lascamento do revestimento.

A água tem a maior temperatura de evaporação entre os líquidos comuns, portanto sob temperaturas usuais, ela tem uma tendência a permanecer em um material no estado líquido, ao invés de evaporar e deixar o material seco.

Em sólidos porosos, sabe-se que movimentos internos e mudanças na estrutura da água causam mudanças de volume que produzem rupturas de muitos tipos.

Por desempenho entende-se o comportamento em serviço de cada produto, ao longo da vida útil, a sua medida espalhará, sempre o resultado do trabalho desenvolvido nas etapas do projeto, construção e manutenção (SOUZA, 2005).

2.3.3.12 Ação do meio ambiente

A qualidade final de uma estrutura de concreto armado depende, tanto do controle de suas propriedades, no estado fresco, como no seu estado endurecido.

Vantagens do concreto:

- permite a execução de grandes peças contínuas:
- pode ser moldado conforme as necessidades:
- tem grande durabilidade e resistência a umidade, fogo, etc:

Apresenta boa impermeabilidade e custo relativamente baixo (ALMEIDA, 2002), (BRANDÃO ,1998)

Segundo (HELENE, 2003), a classificação da agressividade do meio ambiente, está agrupada em quatro classes, a seguir:

Tabela 2.2 - Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	fraca	insignificante
II	média	pequeno
III	forte	grande
IV	muito forte	elevado

2.3.3.13 Pasta do cimento

A deterioração do concreto pode ocorrer, devido à degradação da pasta, dos agregados ou de ambos. Como o agregado é um tipo de rocha, possui maior resistência ao ataque químico.

As funções da pasta do cimento são:

- colatividade (aglutinar os grãos do agregado), sendo ela, mais específica para o concreto endurecido;
- encher os vazios entre os grãos do agregado.

Dependem estas funções de:

- característica do cimento;
- do fator água/cimento;
- do grau de hidratação

São funções da água:

- dar plasticidade ao conjunto;
- reagir com o cimento, permitindo o endurecimento.

2.3.3.14 Componentes do agregado

Agregados – Todos os fatores que afetam a porosidade do concreto interferem na sua permeabilidade e capacidade de absorção, entre eles a forma e as dimensões dos agregados.

São funções dos agregados :

- resistir às cargas solicitadas (cargas em relação as forças externas e internas):
- diminuir as variações de volume que a pasta apresenta:
- baratear o preço do conjunto.

CAPÍTULO 3

3 – ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA E CONFIABILIDADE

3.1– Importância da Análise de Sobrevivência

A Análise de Sobrevivência é uma das áreas da estatística que mais se desenvolveu nas últimas décadas, sendo uma evidência quantitativa desse sucesso o grande número de aplicações principalmente no campo da Medicina e Ciências da Saúde. No presente trabalho, pretende-se desenvolver uma aplicação na área da Engenharia Civil..

A Análise de Sobrevivência aplica-se, a princípio, às situações médicas envolvendo dados censurados. Entretanto, condições similares ocorrem em outras áreas, em que se usam as mesmas técnicas de análise de dados, com nomes diferenciados.

Produtos ou componentes são colocados sob teste para se estimar as características relacionadas aos seus tempos de vida, tempos médios de vida ou probabilidade de um certo componente durar mais do que um tempo T. Outras aplicações também têm sido desenvolvidas por pesquisadores como (NELSON,1990), (MEEKER & ESCOBAR, 1998).

Os engenheiros denominam esta área de confiabilidade. O mesmo ocorre em Ciências Sociais, onde várias situações de interesse têm como resposta o tempo entre eventos observáveis (ALLISON, 1984); (ELANDT-JOHNSON & JOHNSON, (1980).

Uma grande gama de aplicações de Análise de Sobrevivência pode ser também vista na área do Direito, na qual se estuda o tempo entre a liberação de presos e a ocorrência de crimes, na área social, observando a mudança de empregos, desempregos, aposentadoria; nos estudos demográficos, como nascimentos, casamentos e migrações; além disso, ultimamente, vem sendo usada em grande escala na área atuarial e do risco em mercados de ações.

Diante da relevância desta temática serão estudadas algumas funções básicas de sobrevivência, destacando suas características próprias de estimação dos parâmetros para modelos clássicos de distribuições de probabilidade.

3.2 Confiabilidade

3.2.1 Conceito

A palavra confiabilidade significa (FERREIRA, 1986), “qualidade do que é ou de quem é confiável, ou seja, merecedor de crédito, qualidade do que (ou de quem) goza de boa forma, inspira confiança pelo seu talento e discrição; qualidade daquele (ou daquilo) com quem se pode contar”. Portanto, um produto ou componente, serviço ou pessoa confiável ou que tem confiabilidade, é aquele(a) que inspira confiança, no qual se pode acreditar e com o qual se pode contar.

Quando se referir a produtos manufaturados, sobretudo de uso doméstico, a idéia de confiabilidade aparece naturalmente, embutida nos requisitos de qualidade intrínseca do produto, e está geralmente associada a sua durabilidade, que por sua vez está associado a funcionar bem por um longo período de tempo.

A definição de confiabilidade dada pela British Standard, BS 4778; como sendo a capacidade de um item desempenhar satisfatoriamente a sua função requerida, sob condições de operações estabelecidas, por um período de tempo predeterminado. Capacidade é algo abstrato e portanto é necessário se encontrar uma forma de mensurar esta capacidade, ou confiabilidade que poderá ser feita em função do grau de certeza, ou seja, em termos probabilísticos.

Assim, confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operações estabelecidas, por um período de tempo predeterminado. (Colosimo & Freitas, 1997).

A confiabilidade é definida em função de uma medida de probabilidade. Alguns elementos importantes são destacados na definição de probabilidade, como sejam: a necessidade de se definir as funções para os quais o componente seja projetado; definição do desempenho satisfatório; condições de operação e período de tempo para o qual o componente deve funcionar.

A falha prematura de um componente não poderá ser considerada uma indicação de baixa confiabilidade se o uso de suas funções não estejam previstas no projeto. As condições de uso tem importância fundamental. Todo componente é projetado e desenvolvido para ser utilizado sob condições específicas, que podem envolver aspectos de natureza ambiental, como pressão, vibração e radiação, quanto o aspecto de natureza operacional, como carga, manuseio, etc. A falha prematura de um componente só poderá ser considerada de baixa confiabilidade, se sua utilização, tiver ocorrido em condições previstas no projeto.

Outro item importante na confiabilidade é o tempo de missão, que é o período de tempo que o produto deve funcionar. Todo componente é projetado visando um bom desempenho por certo período de tempo preestabelecido, alguns deles permitem reparos durante a missão, outros não. Nesse caso, a probabilidade do componente falhar durante a missão deve ser extremamente baixa.

A confiabilidade de um componente tem impacto na satisfação do usuário, principalmente no tocante à durabilidade. Um componente menos confiável pode necessitar de intervenções mais frequentes para reparos, cujos gastos poderão anular a vantagem inicial de um custo mais baixo de aquisição. Mesmo que esses reparos sejam feitos em período de garantia, mas, só o fato de recorrer ao responsável pela execução dos serviços, já causa transtorno para o usuário e má reputação para quem vendeu.

Para alguns tipos de componentes, a confiabilidade depende de um programa de manutenções preventivas. Essas manutenções dizem respeito a manutenibilidade do componente. Outro aspecto importante no impacto à confiabilidade do componente

são as questões que dizem respeito a segurança do usuário, com medidas adequadas e que sejam tomadas na fase de elaboração do projeto.

Logo, os aspectos durabilidade, manutenibilidade e segurança, devem sempre estar presentes. Isto significa que será necessário estabelecer e cumprir metas relacionadas à confiabilidade. Qualquer que seja a situação, será necessário coletar, processar e dispor de maneira adequada as informações relacionadas à confiabilidade do componente.

A confiabilidade pode ser reportada de várias formas, utilizando-se uma ou mais das seguintes quantidades, denominadas figuras de mérito, (COLOSIMO & FREITAS, 1997)

- MTTF (mean time failure) – tempo médio de falha, utilizado
Para componentes não reparáveis.

- MTBF (mean time between failures) – tempo médio entre falhas.

- MTTR (mean time to repair) - tempo médio de reparo

- Disponibilidade: (D) – indica o grau em que um componente (ou parte dele) estará em condições para iniciar a missão, quando esta for solicitada, em um instante determinado. É obtida através da expressão:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (4.1)$$

3.3 Tempo de Falha

A análise do tempo de falha esta ligada ao conjunto de técnicas estatísticas para a análise de dados de durabilidade provenientes, tanto de campo, quanto de testes de vida. Tanto um como outro, o que se observa são os tempos até a ocorrência da falha. A análise de tempo de falha se propõe a estimar as quantidades de interesse, tais como: o tempo médio até a falha, a fração esperada de falhas no período de garantia, etc.

Componentes fabricados e operando nas mesmas condições , apresentam tempos de falha diferentes. Assim o tempo de falha só deve ser descrito em termos probabilísticos e qualquer análise estatística de dados de confiabilidade deve ser baseada em conceitos bem definidos.

3.3.1 Tipos de falhas

As situações estudadas em confiabilidade, envolvem o tempo até a ocorrência de interesse. Esses eventos são, na maioria dos casos, indesejáveis e usualmente chamados de falha . O primeiro passo a se estudar a confiabilidade de componentes é definir de forma clara e precisa o que vem a ser falha. Em algumas situações, a definição de falha já é clara, mas em outras pode assumir termos ambíguos. As falhas facilmente categorizáveis são, usualmente, as chamadas falhas catastróficas. Isto é, aquelas em que o componente deixa de funcionar. (COLOSIMO & FREITAS, 1997).

Para diferentes partes de um elemento estrutural, definições podem ser estabelecidas para o evento falha. Para partes críticas a falha pode ser o aparecimento de uma pequena trinca, enquanto para partes menos críticas, a falha ocorre quando a trinca atinge um certo tamanho ou largura. O elemento diretamente relacionado ao tempo de falha é a escala da medida , que é sempre o tempo real, apesar de existirem outras possibilidades. Dois elementos básicos a serem definidos em estudos de

confiabilidade são: o evento de interesse, usualmente chamado de tempo de falha e a escala da medida.

3.4 Censura

Uma das principais características em dados de análise de sobrevivência e confiabilidade é a presença de censura, que são as observações incompletas e parciais da resposta.(COLOSIMO & GIOLO, 2006). Resposta é, geralmente, o tempo até a ocorrência de um evento de interesse. Esse tempo é denominado tempo de falha, podendo ser o tempo até um componente perder sua capacidade de desempenhar satisfatoriamente sua função requerida.. Desse modo, observações censuradas são aquelas que não falharam até o final do teste. Mesmo censurados, todos os resultados provenientes de um teste de durabilidade devem ser usados na análise estatística.

Mesmo sendo incompletas, as observações censuradas fornecem informações sobre o tempo de vida do componente. Outra coisa é o efeito produzido na omissão das censuras no cálculo das estimativas das medidas de confiabilidade de interesse. As censuras são observações com maiores tempos de falhas. Conseqüentemente, a qualidade do componente sem as censuras, sendo julgadas através de características de qualidade e durabilidade, estará distorcido.. Estas observações são chamadas de censuras à direita, pois o tempo de falha fica à direita do tempo da censura.

Existem três mecanismos de censura, (COLOSIMO & GIOLO, 2006), figura 3.1

- 1 – Censura por tempo ou tipo I – aquela em que o teste será terminado após um período preestabelecido de tempo.
- 2 – Censura por falha ou tipo II – é aquela em que o teste será terminado após ter ocorrido a falha em um número preestabelecido de itens sob o teste.
- 3 - Censura do tipo aleatório – aquela em que um item é retirado no decorrer do teste sem ter atingido a falha.

A censura por falha do tipo II Figura 3.1., é, geralmente, usada quando temos pouca ou nenhuma informação sobre a durabilidade do componente estudado, Dessa forma, garante-se um número mínimo de falha para se realizar a análise estatística dos dados. Já a censura do tipo I é usada em combinação com informações anteriores sobre o componente, permitindo planejar o tempo de duração do estudo.

Se não houvessem as censuras, o tratamento estatístico somente para as falhas, se usaria algumas técnicas clássicas em estatística, como Análise de Regressão e Planejamento de Experimento.

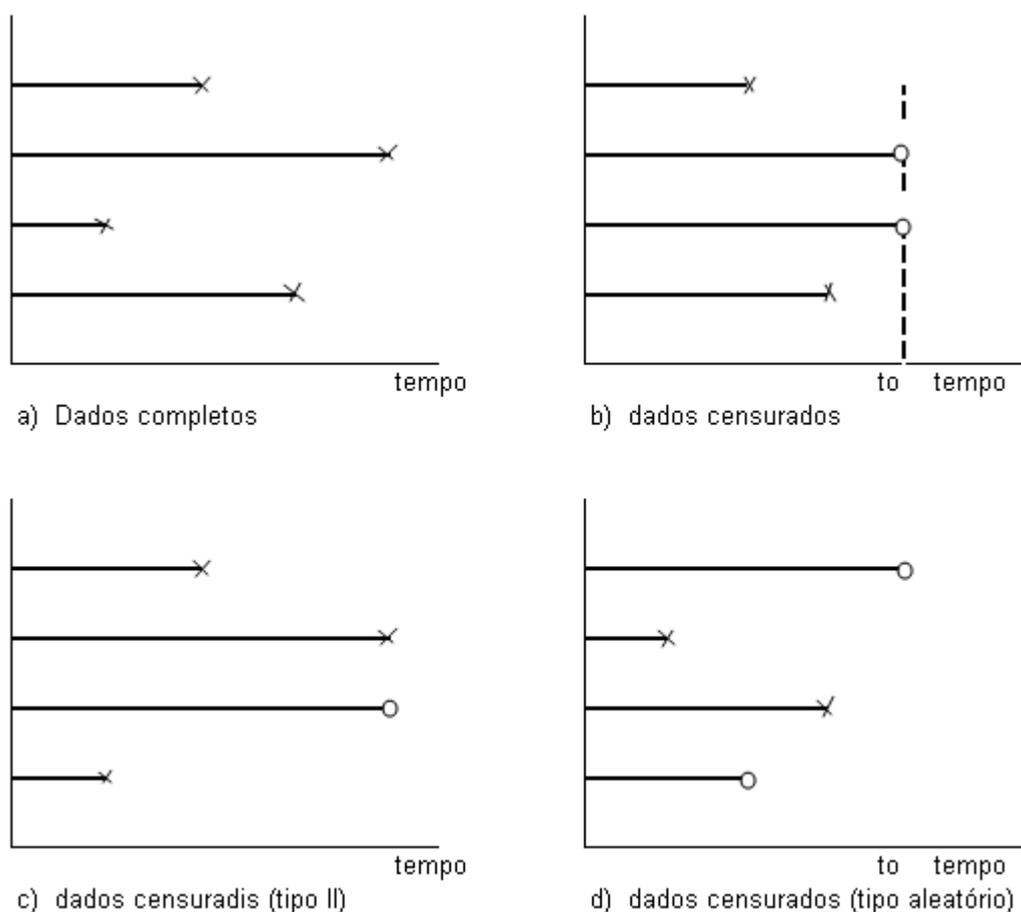


Figura 3.1 – Tipos de dados de confiabilidade

3.5 Função de Confiabilidade

As formas usuais de especificar o tempo até a falha, são a função de confiabilidade e a função de taxa de falha. A função de confiabilidade é definida como a probabilidade de um componente desenvolver sua função sem falhar pelo menos até um certo tempo t , (COLOSIMO & FREITAS,1997), em termos probabilísticos, isto é escrito em função da variável de interesse T , tempo até a ocorrência da falha, como:

$$R(t) = P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (4.2)$$

$R(t)$ = Função de confiabilidade

$P(T \geq t)$ = probabilidade de um componente funcionar mais que t anos

T = tempo para o componente desenvolver sua função sem falhar até a ocorrência da falha

t = tempo em que ocorre a falha

$f(t)$ = função de densidade de probabilidade do tempo de falha

A figura 3.2 mostra a forma típica de duas funções de confiabilidade. As duas curvas representam as Funções de Confiabilidade de dois componentes diferentes que desempenham a mesma função.

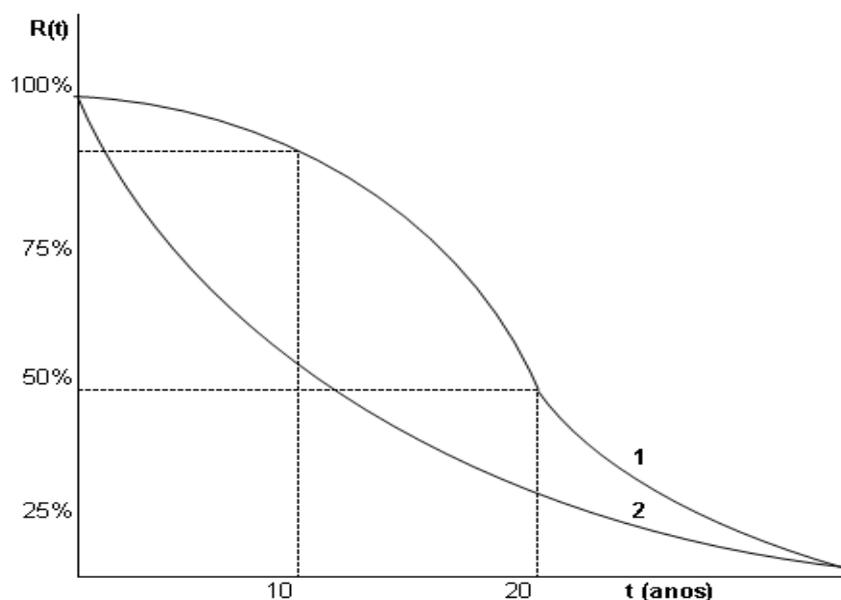


Figura 3.2 – Funções de confiabilidade para dois componentes

O componente 1 é superior ao 2 com relação à durabilidade. Nota-se que em vários componentes 1, o tempo para cerca de 50% deles (tempo mediano) já terem falhado é de 20 anos, enquanto que para o componente 2 este tempo é superior a 10 anos. Outra informação importante na Figura 3.2, é o percentual de componentes que estão em operação até um determinado tempo de interesse. Para ambos os componentes do tipo 1, cerca de 90% deles ainda estarão em operação com 10 anos de uso, enquanto que para o tipo 2, apenas 50%.

3.6 Função da Taxa de Falha

A probabilidade de um componente falhar em um intervalo de tempo $[t_1, t_2]$, pode ser expressa por $R(t_1) - R(t_2)$.

A taxa de falha no intervalo $[t_1, t_2]$ é definida como a probabilidade de que uma falha por unidade de tempo ocorra neste intervalo, dado que esta não ocorreu antes de t_1 , ou seja, a taxa de falha no intervalo $[t_1, t_2]$ é expressa por:

$$\frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} \quad (4.3)$$

De uma forma geral, redefinindo o intervalo como $[t, t + \Delta t]$, a expressão (4.3) acima ficará:

$$h(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} \quad (4.4)$$

Obs: $h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$

é a chamada taxa de falha instantânea ou função intensidade de falha

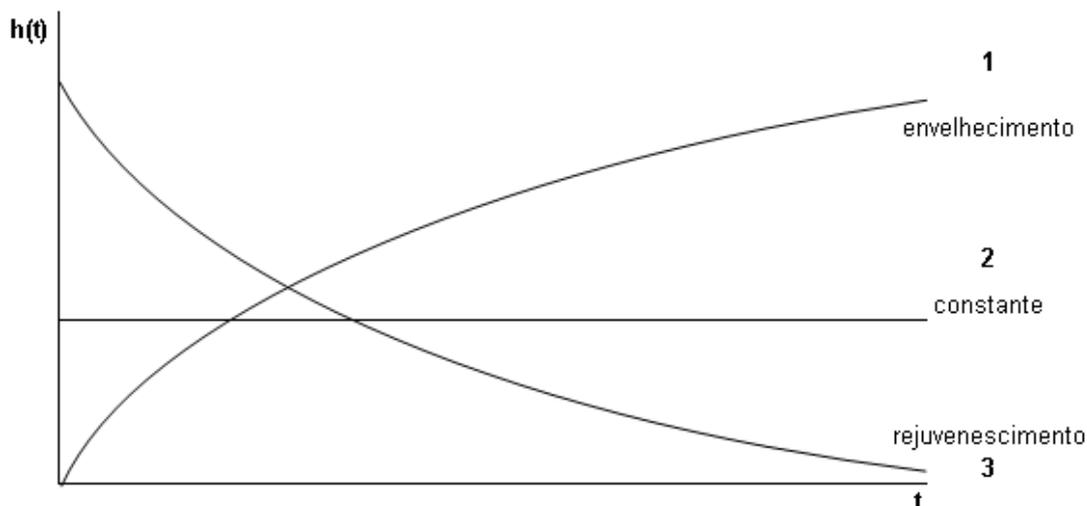


Figura 3.3 – Três funções de Taxa de Falha: 1 – crescente (envelhecimento); 2 – constante e 3 – decrescente (rejuvenescimento)

A figura 3.3 mostra três funções de taxa de falha. A função 1 é crescente, a 2 é constante e a 3, decrescente. A função crescente, indica que a taxa de falha do componente aumenta com o transcorrer do tempo. Este é o comportamento esperado para componentes, com efeito gradual de envelhecimento. Quando a função é constante, a taxa de falha não se altera. Componentes com taxa de falha decrescente são menos comuns.

Existe uma relação entre a taxa de falha $h(t)$ e a função de confiabilidade $R(t)$.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4.5)$$

onde $f(t)$ é a função de densidade de probabilidade de T.

3.6.1 Obtenção dos tempos de falha para estudo

Tendo em vista a dificuldade de encontrar uma massa de dados sobre tempos de falhas de construções ou componentes construtivos, optou-se por utilizar dados da dissertação de (ZARZAR, Jr, 2007), estimados por simulação, a partir do Método dos Fatores, descrito na seção metodológica do presente trabalho.

Nesse sentido foram obtidos, por meio de amostragem aleatória simples uma amostra de 60 (sessenta) valores, em anos, dentre os obtidos por (ZARZAR, Jr. 2007), os quais são listados a seguir e que representam os tempos de falha de componentes construtivos:

10 13 14 20 23 26 28 29 30 33 36 37 38 39 40 41 42 43 44
 45 46 48 49 51 52 53 54 55 57 58 59 60 62 63 64 65 66 69
 71 75 76 77 79 83 85 87 89 91 96 99 *100 *100 *100 *100 *100
 *100 *100 *100 *100 *100

* - valores censurados

3.7 Estimação na Ausência de Censura

A função da taxa de falha é difícil de ser estimada em termos não-paramétricos. A dificuldade é a mesma para estimar a função de densidade.

A figura 3.4, mostra a distribuição aproximada dos tempos de falha para os dados não-censurados. O histograma foi obtido a partir desses dados anteriormente listados. e nos diz quantos componentes falharam num dado período de tempo.

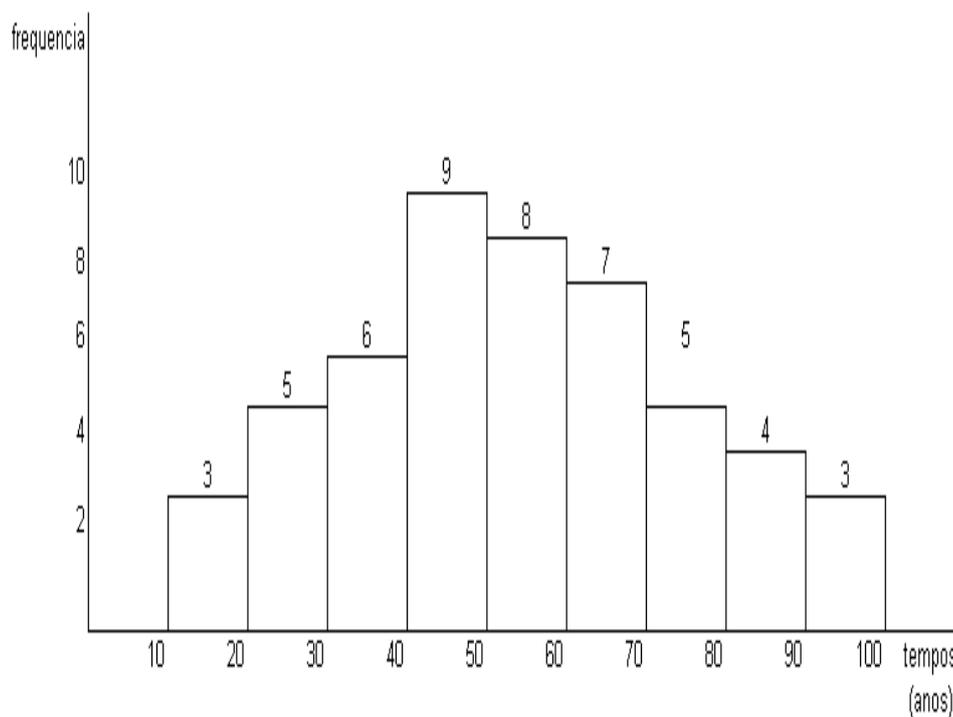


Figura 3.4 – Histograma da Distribuição de Frequência dos Tempos de Falha - Valores não censurados

Uma estimativa para a taxa de falha no período compreendido entre 50 e 60 anos, é dado por :

$$h(50,60) = \frac{\text{número de falhas no intervalo } (50,60)}{\text{número de componentes em operação até } t = 50}$$

$$h(50,60) = \frac{8}{27} = 0,296$$

Ou seja, a taxa de falha é de 29,6% durante o período de 10 anos, compreendido entre 50 e 60 anos, ou seja, um componente que não falhou após 50 anos de uso tem uma probabilidade de 0,296 de vir a falhar no intervalo de 50 a 60 anos. A taxa de falha pode ser expressa 29,6%/10 anos ou 0,296%/ano. Usando o mesmo raciocínio, calculam-se os outros intervalos de tempo, obtendo-se os resultados mostrados na tabela 3.1. Pode notar que a taxa de falha é do tipo crescente.

Tabela 3.1 - Estimativa das Funções de Confiabilidade e de Taxa de Falha para os dados referentes a amostra

Intervalo (anos)	Componentes	Frequência Acumulada (acima)	Taxa de Falha (%/anos)	Confiabilidade (%)
10 - 20	3	50	0,060	100,0
20 - 30	5	47	0,106	94,0
30 - 40	6	42	0,143	84,0
40 - 50	9	36	0,250	72,0
50 - 60	8	27	0,296	54,0
60 - 70	7	19	0,368	38,0
70 - 80	5	12	0,417	24,0
80 - 90	4	7	0,571	14,0
90 - 100	3	3	1,000	6,0

A seguir é apresentado na figura 3.5, o gráfico dos Tempos versus Taxa de falha

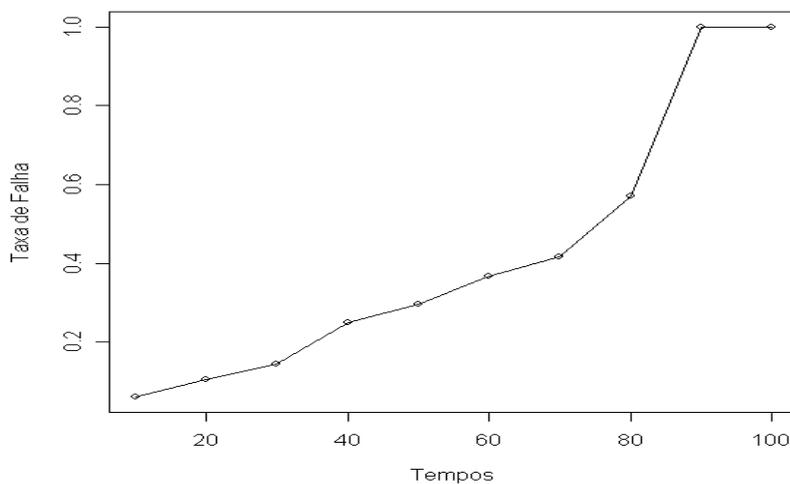


Figura 3.5 Gráfico das Tempos x Taxa de Falha

A função de confiabilidade no tempo $t = 50$ anos, é estimada por:

$$R(50) = \frac{\text{número de componentes em operação até o tempo } t = 50}{\text{número de componentes sob teste}} = \frac{27}{50} = 0,54 \quad (4.6)$$

Isto significa que 54,0% desses componentes duram mais que 50 anos. Repetindo o mesmo tipo de cálculo em cada intervalo de tempo, obtemos os resultados que constam na tabela 3.2

A partir desses valores podem-se obter informações importantes sobre o tempo de vida do componente estudado..

Uma forma alternativa é usar a expressão

$$\frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1) R(t_1)}, \text{ logo:} \quad (4.7)$$

$$h(t) = \frac{R(50) - R(60)}{60 - 50 R(50)} = \frac{(0,54 - 0,38)}{(10)0,54} = \frac{0,16}{5,4} = 0,029 / \text{ano}$$

Ou 0,296%/ano. O mesmo valor encontrado anteriormente na tabela 3.2.

Obs: na expressão $h(50, 60)$ foi tomado o comprimento unitário, obtendo-se uma taxa de falha por 10 anos de uso, enquanto que na expressão $R(50)$, o comprimento é tomado como 10, o que gera uma taxa de falha por 10 anos de uso.

3.8 Estimação da Função de Confiabilidade na Presença de Censura

Até aqui, a estimativa da função de confiabilidade e de taxa de falha para o estudo da durabilidade em que todos os componentes sob teste falharam. Na prática, o conjunto de dados amostrais de tempos de falha apresenta censuras, o que requer técnicas estatísticas específicas para acomodar a informação contida nestas observações. As observações censuradas nos dão somente parte da informação sobre o tempo de falha

dos itens sob o teste, isto é, a observação censurada informa que o tempo até a falha é maior do que aquele no qual a censura foi registrada.

Se a amostra não contiver observações censuradas, a construção de um histograma consistirá na divisão do eixo do tempo em um número de intervalos e, em seguida, conta-se o número de ocorrências de falhas em cada intervalo. Mas quando existem censuras não é possível construir um histograma porque não sabe-se a frequência associada a alguns intervalos.

3.9 Estimador Não-paramétrico de Kaplan-Meier

O estimador não-paramétrico de Kaplan-Meier é construído sem a necessidade de especificar uma distribuição para a variável tempo até a falha. Este estimador é bastante utilizado e vem ganhando cada vez mais espaço em estudos de confiabilidade. O estimador não-paramétrico de Kaplan-Meier, proposto por Kaplan e Meier (1958), é também chamado de estimador do limite-produto.

O estimador de Kaplan-Meier apresenta as seguintes características:

- é um estimador não paramétrico;
- considera tantos intervalos de tempo quanto for o número de falhas ;
- é uma adaptação da função de confiabilidade empírica;
- $R(t)$ é uma função de escada com degraus nos tempos observados de falhas de tamanho $1/n$, onde n é o tamanho da amostra;
- os limites dos intervalos são os tempos de falhas da amostra;
- permite levar em consideração a censura do tipo aleatório (aquela que ocorre antes do término do teste).

Sendo uma adaptação da função de confiabilidade empírica que, na ausência de censura, é definida como:

$$R(t) = \frac{\text{número de itens em operação até o tempo } t}{\text{número de itens sob teste}}$$

$R(t)$ é uma função escada com degraus nos tempos observados de falha

O estimador de Kaplan-Meier, na sua construção considera tantos intervalos de tempo, quantos forem o número de falhas. Os limites dos intervalos de tempo são os tempos de falha da amostra. A forma geral é importante na medida em que permite levar em conta a censura do tipo aleatório, ou seja aquela que ocorre antes do término do teste. Logo, um item pode ser retirado do estudo por ter falhado devido a uma causa diferente da estudada.

O estimador de Kaplan-Meier é definido da seguinte forma: Se existirem n itens sob teste e k ($\leq n$) falhas distintas nos tempos $t_1 < t_2 < \dots < t_k$, será usado a seguinte notação:

- d_i : número de falhas no tempo t_i ;

- n_i : número de itens sob risco (não falhou e não foi censurado) em t_i (exclusive)

No caso de ocorrer censuras e falhas empatadas, ocorrendo simultaneamente, nesta situação adota-se a convenção de que os tempos de censura ocorrem imediatamente após os tempos de falha.

O estimador de Kaplan-Meier de $R(t)$ é definido como:

$$R(t) = \left[\frac{(n_1 - d_1)}{n_1} \right] \left[\frac{(n_2 - d_2)}{n_2} \right] \dots \left[\frac{(n_{t_0} - d_{t_0})}{n_{t_0}} \right] \quad (4.8)$$

Onde t_0 é o maior tempo de falha menor que t

Assim a estimativa de $R(t)$, usando a expressão acima, para os dados da Tabela 4.1, encontra-se:

$$R(20) = \left[\frac{(50-1)}{50} \right] \left[\frac{(49-1)}{49} \right] \left[\frac{(48-1)}{48} \right] = 0,933$$

Isto significa que a estimativa de Kaplan-Meier para a função de confiabilidade no intervalo compreendido entre mais de 10 e menos de 20 anos é de 0,933.

A Tabela 3.3 apresenta os valores estimados da confiabilidade através do estimador de Kaplan-Meier.

Tabela 3.2 - Estimativas de Kaplan-Meier para os dados amostrais

time	n.risk	n.event	survival	std.err	lower 95% CI	upper 95% CI
10	60	1	0.983	0.0165	0.9509	1.000
13	59	1	0.967	0.0232	0.9212	1.000
14	58	1	0.950	0.0281	0.8949	1.000
20	57	1	0.933	0.0322	0.8702	0.996
23	56	1	0.917	0.0357	0.8467	0.987
26	55	1	0.900	0.0387	0.8241	0.976
28	54	1	0.883	0.0414	0.8021	0.965
29	53	1	0.867	0.0439	0.7807	0.953
30	52	1	0.850	0.0461	0.7597	0.940
33	51	1	0.833	0.0481	0.7390	0.928
36	50	1	0.817	0.0500	0.7188	0.915
37	49	1	0.800	0.0516	0.6988	0.901

continua

Continuação da Tabela 3.2

time	n.risk	n.event	survival	std.err	lower 95% CI	upper 95% CI
38	48	1	0.783	0.0532	0.6791	0.888
39	47	1	0.767	0.0546	0.6596	0.874
40	46	1	0.750	0.0559	0.6404	0.860
41	45	1	0.733	0.0571	0.6214	0.845
42	44	1	0.717	0.0582	0.6026	0.831
43	43	1	0.700	0.0592	0.5840	0.816
44	42	1	0.683	0.0601	0.5656	0.801
45	41	1	0.667	0.0609	0.5474	0.786
46	40	1	0.650	0.0616	0.5293	0.771
48	39	1	0.633	0.0622	0.5114	0.755
49	38	1	0.617	0.0628	0.4936	0.740
51	37	1	0.600	0.0632	0.4760	0.724
52	36	1	0.583	0.0636	0.4586	0.708
53	35	1	0.567	0.0640	0.4413	0.692
54	34	1	0.550	0.0642	0.4241	0.676
55	33	1	0.533	0.0644	0.4071	0.660
57	32	1	0.517	0.0645	0.3902	0.643
58	31	1	0.500	0.0645	0.3735	0.627
59	30	1	0.483	0.0645	0.3569	0.610
60	29	1	0.467	0.0644	0.3404	0.593
62	28	1	0.450	0.0642	0.3241	0.576
63	27	1	0.433	0.0640	0.3079	0.559
64	26	1	0.417	0.0636	0.2919	0.541
65	25	1	0.400	0.0632	0.2760	0.524
66	24	1	0.383	0.0628	0.2603	0.506
69	23	1	0.367	0.0622	0.2447	0.489
71	22	1	0.350	0.0616	0.2293	0.471
75	21	1	0.333	0.0609	0.2141	0.453

continua

Continuação da Tabela 3.2

time	n.risk	n.event	survival	std.err	lower 95% CI	upper 95% CI
76	20	1	0.317	0.0601	0.1990	0.434
77	19	1	0.300	0.0592	0.1840	0.416
79	18	1	0.283	0.0582	0.1693	0.397
83	17	1	0.267	0.0571	0.1548	0.379
85	16	1	0.250	0.0559	0.1404	0.360
87	15	1	0.233	0.0546	0.1263	0.340
89	14	1	0.217	0.0532	0.1124	0.321
91	13	1	0.200	0.0516	0.0988	0.301
96	12	1	0.183	0.0500	0.0854	0.281
99	11	1	0.167	0.0481	0.0724	0.261

Fonte: Zarzar, Jr., 2007 - Software R

Os termos em Inglês deve-se de serem comandos internos do software R, onde:

time = tempo de falha

n.risk = número de componentes construtivos sob teste

n.event = quantidade de elementos construtivos para cada tempo de falha

survival = probabilidade de um componente construtivo continuar em operação
ate um determinado tempo t

std.err = erro padrão

lower 95% CI = limite inferior com 95% de confiança

upper 95% CI = limite superior com 95% de confiança

Os termos em inglês faz parte dos comandos internos do software R, onde os valores foram calculados com usando os dados da tabela 4.3.

Observa-se que para t entre 10 a 13 anos, a probabilidade é de do componente construtivo está em operação é de 0,983 ou 98,3% e os intervalos de confiança de 95% são 0,95 e 1,00; para t entre 10 a 14 anos a probabilidade é 0,967 ou 96,7%

com os intervalos de 95% de confiança ou seja 0,921 a 1,00; e para t entre 10 e o próximo valor de t é 0,950 ou 95% com os intervalos de 95% de confiança, ente 0,895 e 1,00. e assim por diante.

Com os resultados da Tabela 3.4 , será feito o gráfico desses valores , a partir do qual pode-se responder a perguntas de interesse. O gráfico é construído mantendo-se o valor de $R(t)$ constante entre os tempos de falha e será apresentado na figura 9.

O gráfico não atinge o valor $R(t) = 0$, isto acontecerá quando o maior tempo observado na amostra corresponder a uma censura.

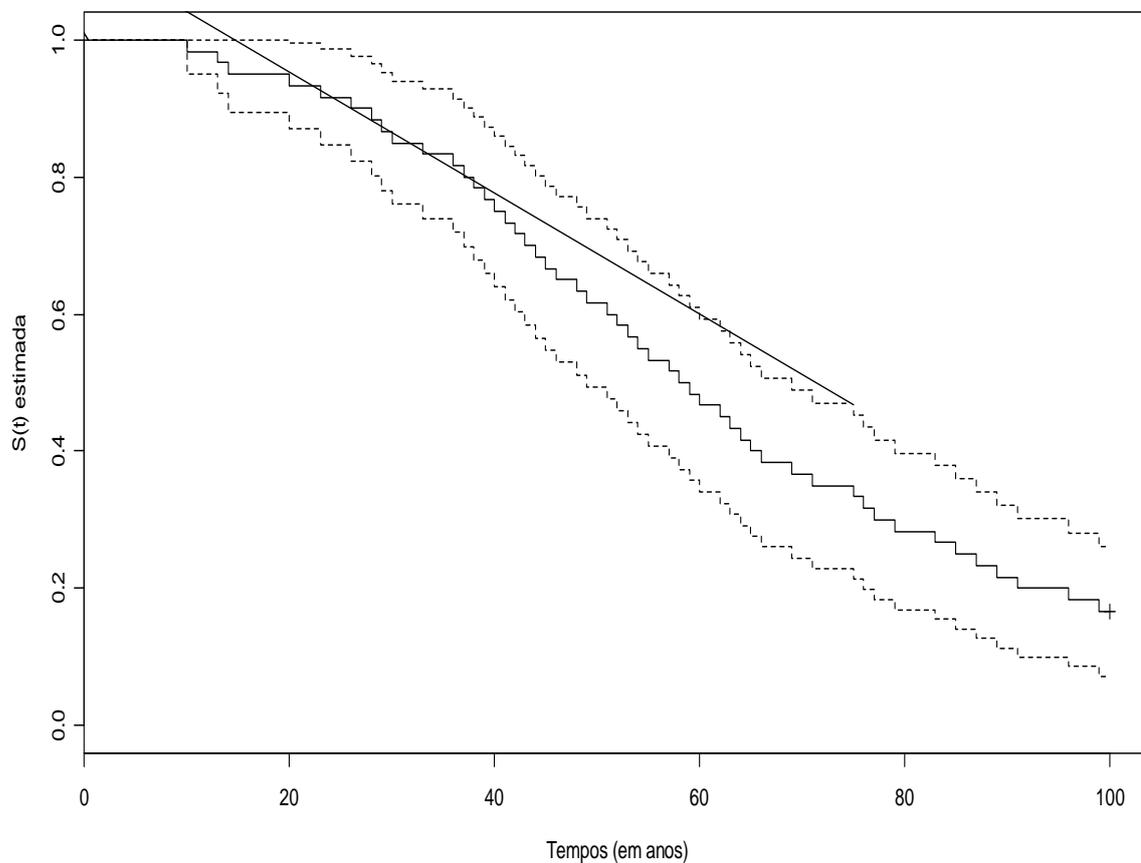


Figura 3.6 - Gráfico da Sobrevivência e respectivos intervalos de 95% de confiança estimados a partir do Estimador de Kaplan-Meier para os dados amostrais

O estimador de Kaplan-Meier é uma técnica não-paramétrica, na qual não é necessário especificar nenhuma distribuição de probabilidade para a variável estudada, que é o tempo até a falha. Existem outras técnicas estatísticas conhecidas, cujo uso na análise de dados de durabilidade requer a especificação de uma distribuição de probabilidade para o tempo de falha. Elas são chamadas de técnicas paramétricas. Os saltos representam a probabilidade dos componentes estarem em uso no respectivo intervalo de tempo, enquanto que as linhas horizontais representam os tempos. A linha mais cheia representa a probabilidade do componente se encontrar dentro de um intervalo e as linhas pontilhadas representam os intervalos com 95% de confiança.

Uma vez escolhida a distribuição de probabilidade que melhor descreve o comportamento do tempo de falha do componente sob teste, é então possível estimar as figuras de mérito de interesse. Se a distribuição de probabilidade for corretamente especificada, as técnicas paramétricas serão mais eficientes que as não-paramétricas.

3.10 Modelos probabilísticos para o tempo de falha

Para conduzir a análise estatística dos dados apresentados na tabela 3.1, é necessário conhecer as principais distribuições de probabilidade. Algumas distribuições de probabilidade são mais conhecidas, mas quando se trata de descrever a variável “tempo de falha”, existem distribuições adequadas para tal uso. Embora exista uma série de modelos probabilísticos utilizados em análise de confiabilidade, entre eles podemos citar os Modelos Exponencial, o de Weibull e o Log-normal, que serão utilizados no presente estudo.

É importante ressaltar que as estimativas obtidas com base em diferentes modelos probabilísticos, podem diferir consideravelmente. Portanto, a escolha de um modelo adequado para descrever a distribuição do tempo de falha deve ser criteriosa, pois a utilização de um modelo inadequado levará a erros grosseiros nas estimativas destas quantidades.

3.10.1 Modelo Exponencial

A distribuição exponencial se caracteriza por ter uma função de taxa de falha constante. É a única com esta propriedade e a mais simples em termos matemáticos. É usada em situações em que as taxas de falhas ocorrem de forma aleatória com uma taxa fixa e sem um expressivo mecanismo de desgaste ou degradação. Tem sido empregada em grande escala como um modelo para o tempo de vida de certos componentes.

A função de densidade para o tempo de falha T com distribuição exponencial, é dada por:

$$f(t) = (1/\alpha) e^{-t/\alpha}, \quad t \geq 0 \quad (4.9)$$

Onde $\alpha \geq 0$, é o tempo médio de vida. O parâmetro α tem a mesma unidade do tempo de falha t . Se t for medido em anos, α também será medido em anos.

A função de confiabilidade $R(t)$, que é a probabilidade de um componente continuar funcionando além do tempo t , é dado, para uma distribuição exponencial, por:

$$R(t) = e^{-t/\alpha} \quad (4.10)$$

A função da taxa de falha associada a distribuição exponencial é constante e igual a $1/\alpha$. A taxa de falha constante indica que tanto um componente antigo que ainda não falhou, quanto um novo tem a mesma probabilidade de falhar em um intervalo futuro. Esta propriedade é chamada de falta de memória da distribuição exponencial.

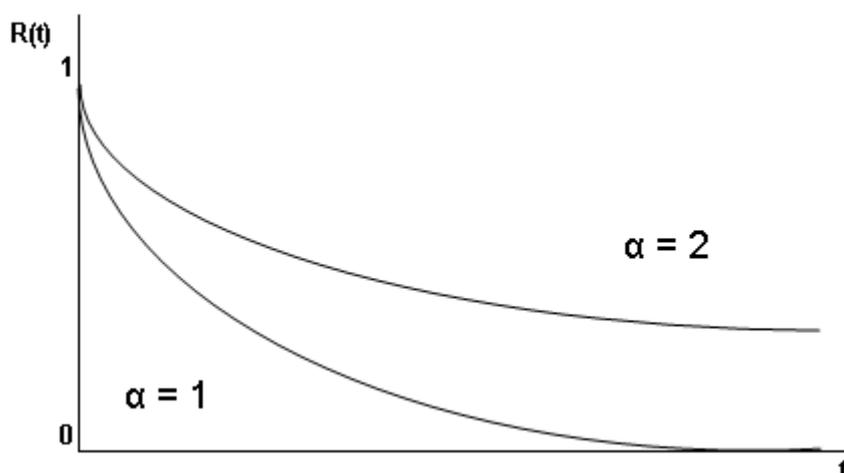


Figura 3.7 – Forma típica da Função de Confiabilidade da Distribuição Exponencial

Aplicação da distribuição exponencial

Para os dados referidos no Capítulo 3, (Zarzar, Jr., 2007), o tempo até a falha de um componente tem uma distribuição exponencial com MTBF (α) = 73,25. A probabilidade de um destes componentes falhar nos primeiros 50 nos de construção é :

$$R(50) = e^{-50/73,25} = 0,506$$

Em estudos de durabilidade, muitas vezes queremos conhecer alguns percentis ,

Logo:

$$t_p = \alpha \ln(1 - p) \quad (4.11)$$

Se quisermos o percentil 10, teremos: $t_{0,10} = 73,25 \ln(1 - 0,10) = 8$ anos.

Isto significa que é esperado que 10% dos componentes falhem nos primeiros 8 anos, desde o início da construção.

3.10.2 – Modelo de Weibull

A distribuição de Weibull (Weibull, 1954), foi proposta a partir de estudos relacionados ao tempo de falha devido a fadiga de metais. Tal distribuição apresenta uma grande variedade de formas, todas com uma propriedade básica que é a sua função de taxa de falha ser monótona, ou seja ela é crescente, decrescente ou constante. Ela descreve adequadamente a vida de diversos componentes. Sua utilidade decorre do fato, de permitir:

- representar falhas típicas de partida;
- falhas aleatórias;
- Falha devido ao desgaste;
- obter parâmetros significativos da configuração das falhas;
- representação gráfica simples

a) principais expressões matemáticas:

a..1 – Probabilidade de falhas de um item, num dado intervalo de tempo “t” de operação.

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\alpha} \right)^\gamma \right] \quad (4.12)$$

$F(t)$ = Função de Distribuição Cumulativa

- α é o parâmetro de escala

- γ é o parâmetro de forma

a.2 – Probabilidade a qual o equipamento não irá falhar para um dado período de tempo “t” de operação (Confiabilidade)

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\alpha} \right)^\gamma \right] \quad (4.13)$$

a.3) Tempo Médio Entre Falhas (TMFF)

$$TMFF = t_0 + \alpha \cdot \Gamma \left[1 + \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right] \quad (4.14)$$

“ Γ ” = Símbolo da Função Gama.

$\Gamma(r) = (r - 1) !$, para r inteiro. Para valores fora do intervalo [1, 2], devem ser encontrados através da expressão recursiva: $\Gamma(r) = (r - 1) \Gamma(r - 1)$.

$$a.4) \quad Var(T) = \alpha^2 \left\{ \Gamma \left[1 + \left(\frac{2}{\gamma} \right) \right] + \Gamma \left[1 + \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right]^2 \right\} \quad (4.15)$$

2 – Significado dos parâmetros t_0 , α e γ da Distribuição de Weibull.

t_0 = Vida mínima ou confiabilidade intrínseca (tempo de operação o qual o componente passa a apresentar falhas, ou seja, intervalo de tempo que o componente não apresenta falhas).

Em muitos casos típicos de desgastes, transcorre um intervalo de tempo t_0 significativo ate que ocorram as primeiras falhas, a taxa de falhas $\lambda(t)$ só é diferente de zero e crescente após o tempo t_0 , de modo que o fator tempo nas expressões de Weibull aparece sempre sob a forma $t - t_0$.

α = Vida característica ou Parâmetro de escala.

Intervalo de tempo entre t_0 e t no qual ocorrem 63,2% das falhas restando, portanto 36,8 de itens sem falhar.

Quando $t - t_0 = \gamma$, $R(t) = e^{-1} = 0,368 = 36,8\%$

γ = fator de Forma (indica a forma da curva e a característica das falhas).

Quando $\gamma < 1$ “mortalidade infantil”

Quando $\gamma = 1$, falhas aleatórias (função exponencial negativa)

Quando $\gamma > 1$, falhas por desgaste.

A função de densidade da distribuição de Weibull é dada por:

$$f(t) = \left(\frac{\gamma}{\alpha^\gamma}\right) t^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\gamma\right], \quad t \geq 0 \quad (4.16)$$

O parâmetro do forma γ e o de escala α são positivos. O parâmetro α tem a mesma unidade de t , e γ não tem unidade. No caso em que $\gamma = 1$, obtemos a distribuição exponencial.

A função de confiabilidade é dada por:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\gamma\right] \quad (4.17)$$

Aplicação da distribuição de Weibull.

O tempo de vida de um componente tem $\alpha = 73,25$ anos e $\gamma = 2,05$. Assim, a confiabilidade para um ano de uso é: $R(50) = \exp[-(50/73,25)^{2,05}] = 0,633$, ou seja a probabilidade de um componente operar por pelo menos um determinado tempo $t = 50$, é de 0,633.

As expressões para a média e a variância da Weibull incluem o uso da função gama,

$$MTTF \text{ (ou } MTBF) = E(T) = \alpha \Gamma \left[1 + \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right], \quad e \quad (4.18)$$

$$Var(T) = \alpha^2 \left\{ \Gamma \left[1 + \left(\frac{2}{\gamma} \right) \right] + \Gamma \left[1 + \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right]^2 \right\} \quad (4.19)$$

Os percentis são dados por:

$$t_p = \alpha \left[-\ln(1-p) \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (4.20)$$

Aplicação:

O tempo médio da vida de um componente é $73,25 \Gamma(1 + 1/2,05) =$

$$= 73,25 \times 0,886 = 64,9 \text{ anos}$$

Os percentis são dados por:

$$t_p = \alpha \left[-\ln(1-p) \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (4.21)$$

O percentil 10 é $t = 73,25(-\ln(1-0,10))^{1/2,05} = 73,25(-\ln(0,9))^{0,49} = 62 \text{ anos}$.

A distribuição de Weibull tem uma função da Taxa de Falha dada por:

$$h(t) = \left(\frac{\gamma}{\alpha} \right) \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\gamma-1}, \quad t \geq 0 \quad (4.22)$$

$h(t)$ é estritamente crescente para $\gamma > 1$, e estritamente decrescente para $\gamma < 1$. A distribuição exponencial é um caso particular da distribuição de Weibull quando $\gamma = 1$, com taxa de falha constante.

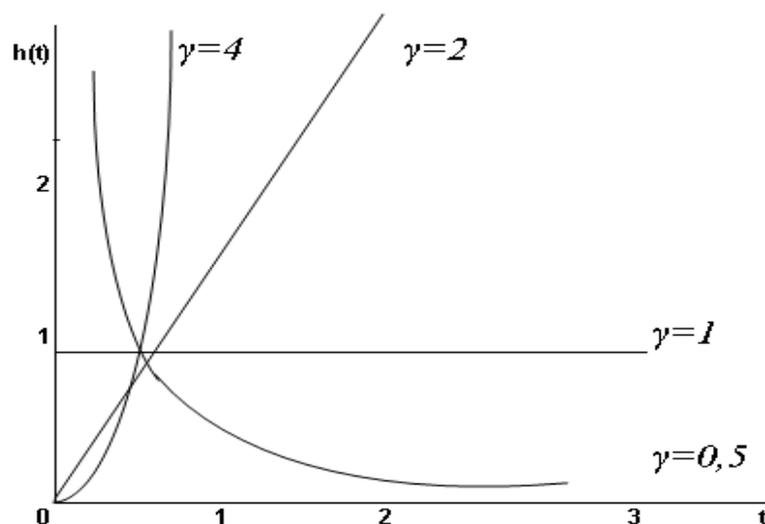


Figura 3.8 – Forma típica da Função da Taxa de Falha de Weibull, com $\alpha=1$ e $\gamma=0,5$; 1; 2 e 4

Weibull – Cálculo matemático (Aplicação)

A tabela 3.4, representa os cinquenta componentes construtivos, anotados os tempos de falha de cada um, obtidos na tabela 3.3 .

Tabela 3.3 – Distribuição de Freqüência dos dados amostrais

Tempos de falha (anos)	Freqüências observadas
10 ----- 20	3
20 ----- 30	5
30 ----- 40	6
40 ----- 50	7
50 ----- 60	9
60 ----- 70	8
70 ----- 80	6
80 ----- 90	4
90 ----- 100	2
Total	50

1 – Com os dados da tabela 3.4 , pode-se obter::

- A vida mínima ou intrínseca confiança “ t_0 ” - -> (tempo livre de falha)
- A característica de vida ou parâmetro escala (α)
- O parâmetro de forma (β) e características de falha

- d) O Coeficiente de correlação (r)
 - e) A probabilidade de falha para a operação no intervalo de 50 anos
 - f) A confiança para a operação no intervalo de 40 anos
 - g) MTTF(media de tempo para falhar) das observações
 - h) O desvio padrão
 - i) O coeficiente de variação
 - j) Traçar o gráfico de confiança
- l)– Se o custo da manutenção corretiva por intervenção (Cmc) for \$600,00 e o custo de manutenção preventiva por intervenção for \$250,00, o período ótimo para se para efetuar a manutenção preventiva será:

Tabela 3.4 – Freqüências observadas, relativas e acumuladas

Tempo de falha (anos)	Freqüências observadas	Freqüência relativa	Freqüência relativa acumulada
10 ----- 20	3	0,06	0,06
20 ----- 30	5	0,10	0,16
30 ----- 40	6	0,12	0,28
40 ----- 50	7	0,14	0,42
50 ----- 60	9	0,18	0,60
60 ----- 70	8	0,16	0,76
70 ----- 80	6	0,12	0,88
80 ----- 90	4	0,08	0,96
90 ----- 100	2	0,04	1,00

Para determinar “ t_0 ” existem três métodos:

- 1) tentativa;
- 2) gráfico;

3) programa de computador

Tentativa: por meio de seleção arbitrária de valores para “ t_0 ”. O valor dado ao melhor coeficiente de correlação, será o mais adequado.

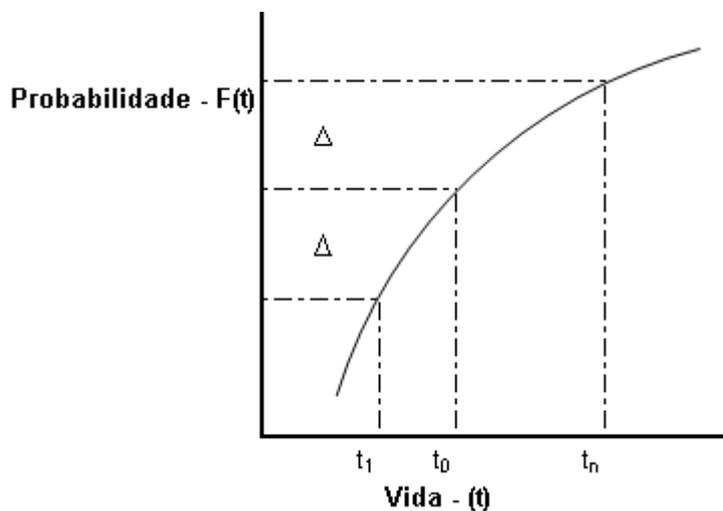


Figura 3.9 - Método gráfico dos Tempos de Vida x Probabilidade, para determinação de t_0

$$t_0 = t_2 - \frac{(t_3 - t_2) \cdot (t_2 - t_1)}{(t_3 - t_2) - (t_2 - t_1)} \quad (4.23)$$

Programa de computador: Por meio de tentativas, onde alguns valores para t_0 , são testados, sendo escolhidos os que apresentam maior coeficiente de correlação. Para este caso, foi considerado $t_0 = 10$ anos.

b) e c) Sabemos que a frequência acumulada de falhas para a distribuição de

Weibull é dada por:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \frac{(t - t_0)}{\alpha} \right]^\gamma \quad (4.24)$$

transformando na forma linear, obtemos :

$$\text{Ln}\{-\text{Ln}[1-F(t)]\} = \gamma \cdot \text{Ln}(t-t_0) - \gamma \text{Ln} \alpha$$

$$Y = a \cdot X + b \quad (4.25)$$

Então, pode-se construir a seguinte tabela, tomando-se os limites superiores:

Continuação da Tabela 3.4- Aplicação de logarítmos

T	F(t) Freq. Relat. Acum.	Y=Ln{-Ln[1-F(t)]}	X=Ln(t - to) to = 10 anos
20	0,06	-2,7826	2,3026
30	0,16	-1,7467	2,9957
40	0,28	-1,1132	3,4012
50	0,42	-0,6075	3,6889
60	0,6	0,0874	3,912
70	0,76	0,3557	4,0943
80	0,88	0,7515	4,2485
90	0,96	1,169	4,382
100	1,00	----	---

Agora aplicando a regressão linear para determinar “ α ” e “ γ ”

Continuação da Tabela 3.4

Ordem	Yi	Xi	Yi ²	Xi ²	Xi Yi
1	-2,7826	2,3026	7,7429	5,302	-6,4072
2	-1,7467	2,9957	3,051	8,9742	-5,2326
3	1,1132	3,4012	1,2392	11,5682	-3,7862
4	-0,6075	3,6889	0,3691	13,608	-2,241
5	0,0874	3,912	0,0076	15,3037	0,3419
6	0,3557	4,0943	0,1265	16,7633	1,4563
7	0,7515	4,2485	0,5648	18,0498	3,1927
8	1,169	4,382	1,3666	19,2019	5,1226
Σ	-3,8864	29,0252	14,4676	108,771	-7,5535

Determinação do coeficiente angular (γ)

$$a = \gamma = \frac{n \Sigma X_i Y_i - \Sigma X_i \cdot \Sigma Y_i}{n \Sigma X_i^2 - (\Sigma X_i)^2} \quad (4.26)$$

$$\gamma = \frac{8(-7,5535) - 29,0252(-3,8864)}{8(108,7710) - (29,0252)^2} = 1,8907$$

$\gamma = 1,8907$ (parâmetro de forma)

Determinação do coeficiente linear ($-\gamma \cdot \text{Ln } \alpha$)

$$b = -\gamma \cdot \text{Ln } \alpha = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} - a \cdot \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.27)$$

substituindo:

$$= -\frac{3,8864}{8} - 1,8907 \cdot \frac{29,0252}{8} = -7,3456$$

Então: $-\gamma \cdot \text{Ln } \alpha = -7,3456$, onde: $-1,8907 \text{ Ln } \alpha = -7,3456$

$$\text{Ln } \alpha = \frac{-7,3456}{-1,8907} = 3,8851$$

$$\alpha = e^{3,8851}$$

c) $\alpha = 48,67$ anos (vida característica –Determinação do coeficiente de correlação)

O coeficiente de Correlação de Pearson (r) varia de -1 a 1, e é calculado por:

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (4.28)$$

Substituindo os valores encontra-se :

$$r = \frac{8(-7,5535) - 29,0252(-3,8864)}{\sqrt{[8 \times 108,7710 - (29,0252)^2][8 \times 14,4674 - (-3,8864)^2]}} = 0,9919$$

ou seja as variáveis X e Y têm forte correlação positiva.

e) Probabilidade de falha para um intervalo de operação de (t = 50 anos)

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\alpha} \right)^\gamma \right] = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - 10}{48,67} \right)^{1,8907} \right] \quad (4.29)$$

Para t = 50 horas, temos:

$$F(50) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{50 - 10}{48,67} \right)^{1,8907} \right] = 0,4985$$

f) A confiança para um intervalo de operação de 50 anos

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\alpha} \right)^\gamma \right] = \exp \left[- \left(\frac{50 - 10}{48,67} \right)^{1,8907} \right] = 0,5015$$

g) Tempo médio de falha do componente – MTTF (Mean Time To failure)

$$\text{MTTF} = t_0 + \alpha \cdot \Gamma(1 + \gamma^{-1}) = 10 + 48,67 \times 0,887 = \mathbf{53,17 \text{ anos.}}$$

(4.29)

h) Desvio padrão

$$\sigma = \alpha \cdot [\Gamma(1 + 2\gamma^{-1}) - \Gamma^2(1 + \gamma^{-1})]^{1/2} \quad (4.30)$$

$$\sigma = 48,67 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{1,8907} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{1,8907} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 48,67 \times (0,990 - 0,887)^{1/2} = \mathbf{15,62 \text{ anos}}$$

I) Coeficiente de variação:

$$C_v = \frac{\sigma}{MTTF - t_0} = \frac{15,62}{53,17 - 10} = 0,3618 \text{ ou } 36,18\% \quad (4.31)$$

j) Gráfico de confiança

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\alpha} \right)^\gamma \right] = \exp \left[- \left(\frac{t - 10}{48,67} \right)^{1,8907} \right]$$

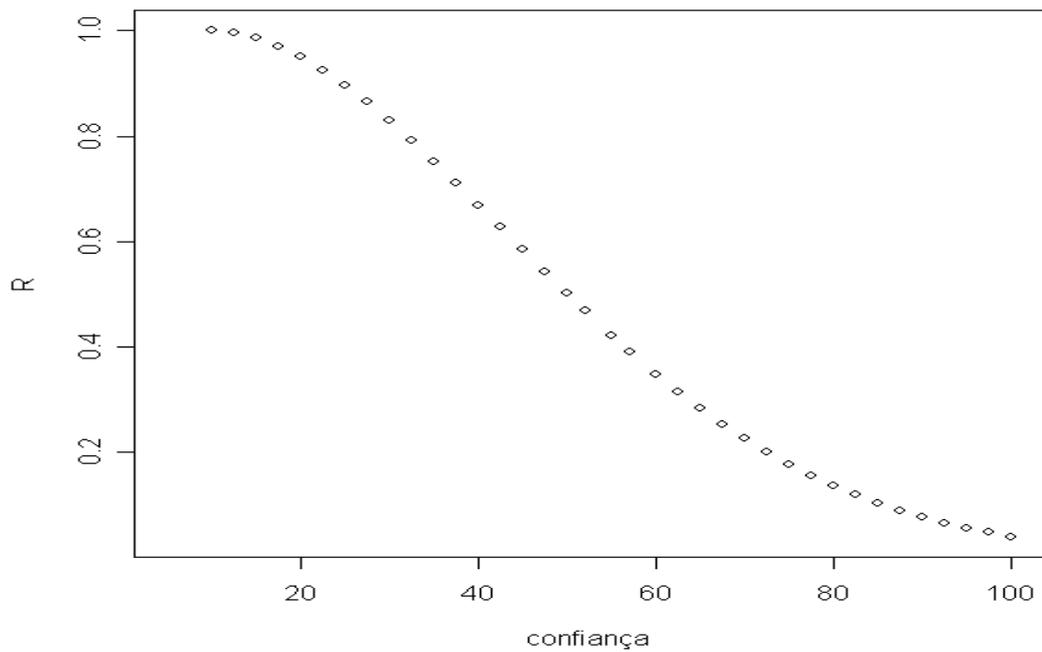


Figura 3.10 - Gráfico de confiança dos componentes

l) Intervalo de manutenção preventiva

Considerando que:

$$t_0 = 10 \text{anos,}$$

$$\alpha = 48,67 \text{ anos}$$

$$\gamma = 1,8907$$

$$Cv = 0,36$$

$$Cmc = \$600,00$$

$$Cmp = \$250,00$$

Onde :

Cv = Coeficiente de Variação

Cmc = custo de Manutenção Corretiva

Cmp = custo de Manutenção Preventiva

Existe um tempo finito para executar a manutenção preventiva, quando:

$$\frac{Cmp}{Cmc} < \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{MTTF - t_0} \right)^2 \right] \quad (4.32)$$

Podemos também usar o gráfico abaixo

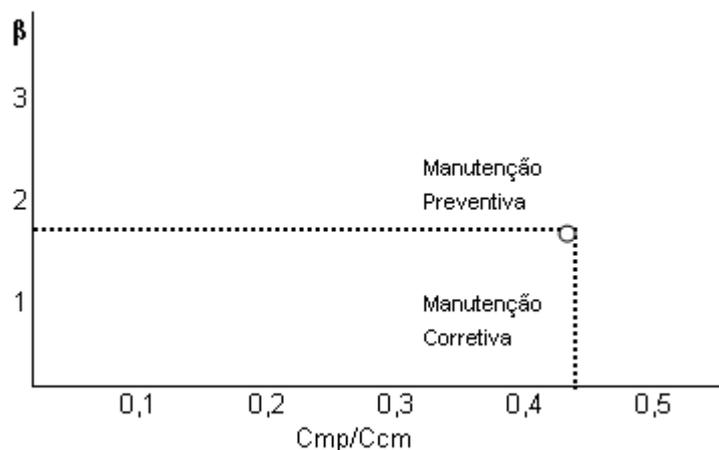


Figura 3.11 – Manutenção preventiva e corretiva (Parâmetro de forma x Cmp/Cmc)

Se a equação abaixo é verdadeira, então o intervalo de tempo ótimo para executar a manutenção preventiva, é dado por:

$$T = t_0 + \alpha \left[\left(\frac{Cmp}{Cmc} \cdot \frac{1}{\gamma - 1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] \quad (4.33)$$

Entrando com os valores, obtemos:

Condição:

$$(250/600) < 1/2(1 - (0,36)^2)$$

$$0,417 < 0,435 \quad \leq \text{verdade}$$

Intervalo Ótimo

$$T = 10 + 48,67 \left(\frac{250}{600} \cdot \frac{1}{1,8907 - 1} \right)^{\frac{1}{1,8907}}$$

$$= \mathbf{42,58 \text{ anos}}$$

(HELENE,1997) ressalta que do ponto de vista econômico, todas as medidas visando durabilidade , tomadas a nível de projeto, são sempre muitas vezes mais convenientes

, mais seguras e mais baratas que medidas protetoras tomadas a posteriori. Os custos de intervenção na estrutura para atingir um certo nível de durabilidade e proteção, crescem exponencialmente quanto mais tarde for essa intervenção. A evolução desse custo pode ser assimilado ao de uma progressão geométrica de razão 5, conhecida por lei dos 5 ou regra de Sitter, representada abaixo.

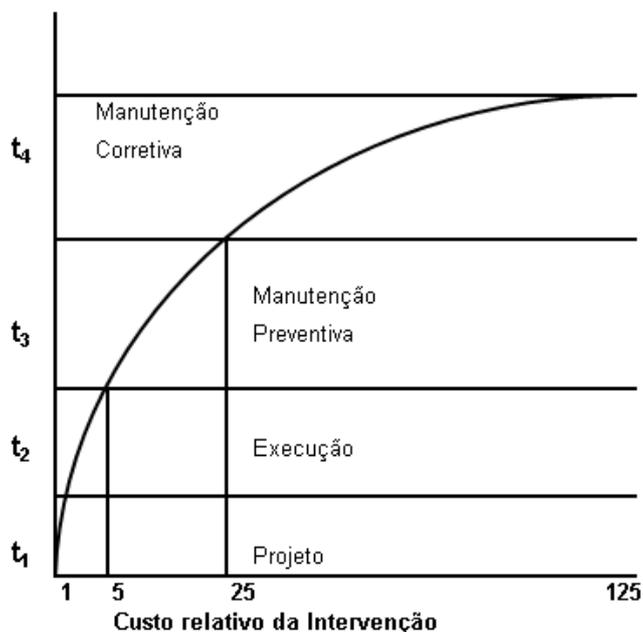


Figura 3.12 – Representação da evolução dos custos em função da fase da vida da estrutura em que a intervenção é feita. (Helene 1992)

O significado dessa lei pode ser assim exposto, segundo a intervenção:

- a) fase do projeto: toda medida tomada a nível de projeto com o objetivo de aumentar a proteção e a durabilidade da estrutura, como aumentar o cobrimento da armadura, reduzir a relação água/cimento do concreto ou aumentar o f_{ck} , especificar certas adições, e outras mais que implicam em redução de custo com manutenção.
- b) fase de execução: toda medida extra-projeto tomada durante a fase de execução propriamente dita, implica num custo cinco vezes superior ao custo que acarretaria tomar uma medida equivalente na fase de projeto para obter-se o mesmo nível final de durabilidade ou de vida útil da estrutura.

- d) fase de manutenção preventiva: as operações de manutenção do tipo pinturas freqüentes, limpeza de fachada sem beirais e sem proteções, impermeabilizações de coberturas e reservatórios mal projetados e outras necessárias a assegurar as boas condições da estrutura durante o período da sua vida útil podem custar até vinte e cinco vezes mais que medidas certas tomadas durante a fase de projeto estrutural ou arquitetônico. Por outro lado podem ser cinco vezes mais econômicas que aguardar a estrutura apresentar problemas patológicos evidentes que requeiram uma manutenção corretiva.
- d) fase da manutenção corretiva: corresponde aos trabalhos de diagnóstico, reparo, reforço e proteção das estruturas que já perderam sua vida útil de projeto e e apresentam manifestações patológicas evidentes. A estas atividades pode-se associar um custo cento e vinte e cinco vezes superior ao custo das medidas que poderiam ser tomadas na fase de projeto e que implicariam no mesmo nível de durabilidade que se estime dessa obra após essa intervenção corretiva.

3.10.3 – Distribuição Log-normal

A distribuição log-normal é umas das que melhor descreve os tempos de vida de componentes cujos mecanismos de falha envolvem interações químicas, como as encontradas em processo de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas, degradação de contatos, etc. Ela é bastante utilizada para caracterizar tempo de vida de produtos e materiais. É também adequada para os mecanismos de falha por fadiga em materiais.

- A função de densidade para uma distribuição log-normal é dada por:

$$f(t_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t\sigma}} \exp\left\{-\frac{[-\ln(t) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad t \geq 0 \quad (4.34)$$

Onde μ é a média do logaritmo do tempo de falha, e σ o desvio padrão.

O logaritmo natural de uma variável com distribuição σ , com parâmetros μ e σ , tem uma distribuição Normal com média μ e desvio padrão σ . Esta relação significa que dados provenientes de uma distribuição log-normal podem ser analisados segundo uma distribuição Normal se trabalharmos com o logaritmo natural dos dados ao invés de seus valores originais.

A função de confiabilidade de uma variável log-normal é dada por:

$$R(t) = \Phi\left\{\frac{[-\ln(t) - \mu]}{\sigma}\right\} \quad (4.35)$$

Onde $\Phi(\cdot)$ é a função de distribuição acumulada de uma Normal padrão, ou seja, de uma Normal com media igual a zero e desvio padrão igual a um.

A função da taxa de falha da distribuição Log-normal não tem uma forma fechada, assim como sua função de confiabilidade. Estas funções não são monótonas como as da distribuição de Weibull. Quando σ está em torno de 0,5, $h(t)$ é aproximadamente constante e para $\sigma \leq 0,2$, $h(t)$ cresce inicialmente de forma muito rápida. Para valores de $\sigma > 1$, a curva de $h(t)$ cresce rapidamente e em seguida, decresce lentamente..

- Os percentis para a distribuição log-normal podem ser obtidos a partir da tabela da normal padrão e são dados pela expressão:

$$t_p = \exp(z_p \sigma + \mu) \quad (4.36)$$

onde z_p é o 100p% percentil da normal padrão. A média e a variância da distribuição log-normal são dadas respectivamente por :

$$E(T) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad e \quad Var(T) = \exp(2\mu + \sigma^2)[\exp(\sigma^2) - 1] \quad (4.37)$$

A distribuição Log-normal se aplica nos casos em que uma transformação log-natural resulte em uma distribuição Normal.

A media da distribuição Log-normal dos dados da tabela 3.1, é igual a 4,05 e o desvio padrão igual a 0,63. Então a probabilidade que um componente exceda a 50 anos, será:

$$P(X > 50) = 1 - P(X \leq 50), \text{ já que } \ln(X) \text{ tem distribuição normal com } \mu = 4,05 \text{ e desvio padrão } \sigma = 0,63,$$

$$Z = \frac{\ln(X) - \mu}{\sigma}$$

$$P(X \geq 50 \text{ anos}) = \Phi\left[\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right] = \frac{3,91 - 4,05}{0,63} = \Phi(0,22) = 0,5871$$

ou seja, a probabilidade de que um componente exceda 50 anos de uso é de 0,5871 e Φ denota a função de distribuição acumulada da distribuição normal padrão.

Para determinar o quinto percentil da vida dos componentes da Tabela 3.1, sabe-se que $P(Z < -1,645) = 0,05$. Considerando que X é a vida dos componentes. Já que $\ln(X)$ tem distribuição normal, o quinto percentil pode ser calculado como:

$\ln(X) = (-1,645)(0,63) = -1,04$ onde $\ln(X) = \mu - 1,04 = 4,05 - 1,04 = 3,01$ e portanto, $x = 20$ anos, isto significa que apenas 5% dos componentes terão vida menor que 20 anos.

3.11 Outros Modelos probabilísticos

Existem outras distribuições de probabilidade que também são apropriadas para modelar o tempo de vida de componentes e materiais. Entre elas pode-se citar as distribuições Gama, Log-logística e Gompertz.

A popular função de taxa de falha do tipo ‘banheira’, (COLOSIMO & FREITAS, 1997), descreve o comportamento das taxas de falhas de certos produtos industriais. e distingue três regiões distintas:

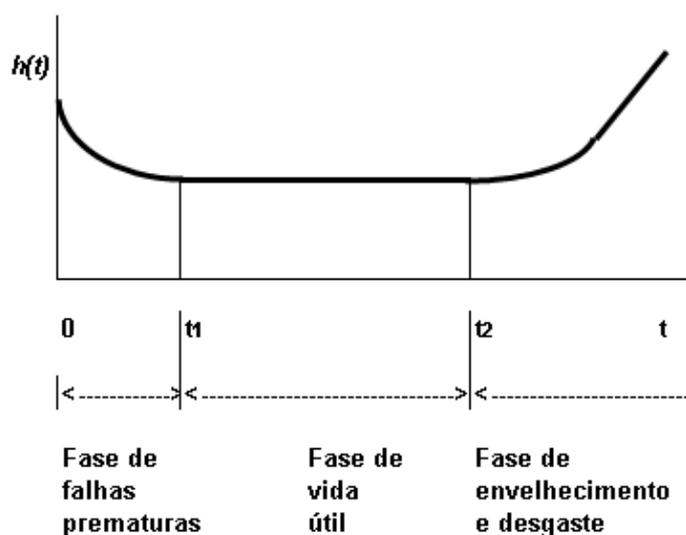


Figura 3.13 – Função da Taxa de Falha tipo “banheira” – (Colosimo e Freitas,1997)

Período de falhas prematuras : é caracterizada por uma taxa de falha alta que decresce rapidamente com o tempo. Neste período, uma pequena porcentagem da população apresenta falhas devido a defeitos grosseiros de fabricação ou itens que sofreram solicitações (estresses) extraordinariamente antes do uso. As falhas prematuras podem ser removidas por um pré-envelhecimento conhecido por burn in (JENSEN & PETERSEN, 1982). Esta parte da curva é conhecida como mortalidade infantil.

Período de vida útil: esse período se caracteriza por uma taxa de falha aproximadamente constante. As falhas ocorrem de forma ocasional decorrentes de solicitações normais de uso, diferentes combinações de condições de uso, acidentes ocasionados pelo uso incorreto e manutenção inadequada a até de debilidade inerentes ao projeto.

Período de desgaste: apresenta uma taxa de falha crescente devido ao processo natural de envelhecimento ou desgaste do produto. Estas falhas podem ser evitadas por um programa adequado de manutenção preventiva.

3.12 - Escolha do modelo

A escolha do modelo a ser utilizado é um tópico extremamente importante na análise paramétrica de dados de confiabilidade. Somente após se identificar o modelo adequado para explicar o comportamento dos dados, pode-se estimar as quantidades de interesse. Se o modelo for usado inadequadamente, toda a análise estatística fica comprometida e conseqüentemente às respostas às perguntas de interesses ficarão distorcidas

Algumas vezes existem evidências provenientes de testes realizados para a escolha de modelo. No entanto, em muitas situações esse tipo de informação não é disponível.

A solução para estas situações é basicamente empírica. A proposta empírica consiste em ajustar os modelos Exponencial, Weibull e Log-normal, e com base na comparação entre valores estimados e observados, decidir qual deles “melhor” explica os dados amostrais. Existem duas maneiras de discriminar modelos: através de técnicas gráficas e de testes de adequação.

- a) Comparar a estimativa da função de confiança do modelo candidato com a estimativa da função de confiabilidade obtida através de um método não-

paramétrico. Devido a presença de censuras em dados de durabilidade, a generalização deste estimador é o Kaplan-Meier;

b) visualmente, onde o olho humano pode distinguir bem entre uma linha reta e uma curva..

3.13 Comparação direta da função de confiabilidade do modelo proposto com o estimador de Kaplan-Meier

Ajusta-se os modelos propostos Exponencial, Weibull e Log-normal ao conjunto de dados e, a partir das estimativas dos parâmetros de cada modelo, estima-se a função de confiabilidade que são representadas por $R_{KM}(t)$, $R_{exp}(t)$, $R_W(t)$ e $R_{ln}(t)$, respectivamente. Compara-se graficamente as funções de confiabilidade estimadas para cada modelo proposto com o modelo $R_{KM}(t)$. O modelo ou os modelos adequado(s) é ou são aquele(s) para o qual(is) sua(s) curva(s) se aproxime daquela do estimador de Kaplan-Meier. Assim, o “melhor” modelo será aquele cujos pontos da função de confiabilidade estimada, no gráfico, estiverem mais próximos dos valores obtidos pela estimativa de Kaplan-Meier, ou seja da reta $y = x$, onde no gráfico, $y = R_{KM}(t)$, e $x = R_{exp}(t)$, $x = R_W(t)$ e $x = R_{ln}(t)$

As etapas para utilização do método gráfico, são:

- obter a estimativa de Kaplan-Meier da função de confiabilidade $R_{KM}(t)$
- ajustar os modelos Exponencial, Weibull e Log-normal. A partir da estimativa dos parâmetros destes modelos, encontrar as funções de confiabilidade $R_{exp}(t)$, Exponencial), $R_W(t)$ Weibull e $R_{ln}(t)$ Log-normal.
- construir os gráficos $R_{KM}(t)$ vs $R_{exp}(t)$, $R_{KM}(t)$ vs $R_W(t)$, e $R_{KM}(t)$ vs $R_{ln}(t)$ nos tempos t onde ocorrem as falhas.
- verificar em qual ou qual(is) dos gráficos os pontos estão mais próximos da Reta $y = x$. onde $y = R_{KM}(t)$ e $x = R_{exp}(t)$ ou $x = R_W(t)$ ou $x = R_{ln}(t)$

Logo, são traçados três gráficos, e para cada um deles, o eixo dos x representa os valores das probabilidades do modelo de Kaplan-Meier. O eixo dos y representa os valores das probabilidades dos modelos Exponencial, Weibull e Log-normal. O gráfico em que os pontos das probabilidades estiverem mais próximos da linha diagonal, será o modelo que melhor se ajusta aos dados estudados.

As expressões das estimativas das funções de confiabilidade para os Modelos Exponencial, de Weibull e Log-normal são:

$$R_{\text{exp}}(t) = \exp(-t/73,4) , \quad \text{onde } \alpha = 73,4$$

$$R_{\text{w}}(t) = \exp(-(t/73,2)^{2,04}) , \quad \text{onde } \alpha = 73,2 \text{ e } \gamma = 2,04$$

$$R_{\text{ln}}(t) = \Phi [-(\ln(t) - 4,05)/0,63] , \quad \text{onde } \mu = 4,05 \text{ e } \sigma = 0,63$$

Após serem calculadas todas as probabilidades para cada tempo de falha, dos três modelos, a forma de se decidir pelo melhor, mais adiante, será feito visualmente através dos gráficos ou através do teste de adequação.

Tabela 3.5 - Estimativas de Kaplan-Meier, Exponencial, Weibull e Log-normal

	time	st	ste	stw	stln
[1,]	10	0.9833333	0.8726334	0.9832471	0.9972286
[2,]	13	0.9666667	0.8376862	0.9714853	0.9907939
[3,]	14	0.9500000	0.8263510	0.9668852	0.9874413
[4,]	20	0.9333333	0.7614890	0.9324290	0.9528797
[5,]	23	0.9166667	0.7309929	0.9110350	0.9266931
[6,]	26	0.9000000	0.7017182	0.8871001	0.8956213
[7,]	28	0.8833333	0.6828559	0.8698344	0.8727231
[8,]	29	0.8666667	0.6736158	0.8608337	0.8607416
[9,]	30	0.8500000	0.6645007	0.8515995	0.8484587
[10,]	33	0.8333333	0.6378888	0.8225865	0.8101799

Continuação da tabela 3.5

[11,]	36	0.8166667	0.6123427	0.7918063	0.7704853
[12,]	37	0.8000000	0.6040567	0.7811989	0.7570847
[13,]	38	0.7833333	0.5958829	0.7704345	0.7436454
[14,]	39	0.7666667	0.5878196	0.7595230	0.7301921
[15,]	40	0.7500000	0.5798655	0.7484747	0.7167478
[16,]	41	0.7333333	0.5720190	0.7372997	0.7033336
[17,]	42	0.7166667	0.5642787	0.7260081	0.6899690
[18,]	43	0.7000000	0.5566431	0.7146102	0.6766719
[19,]	44	0.6833333	0.5491108	0.7031161	0.6634587
[20,]	45	0.6666667	0.5416805	0.6915361	0.6503442
[21,]	46	0.6500000	0.5343507	0.6798801	0.6373419
[22,]	48	0.6333333	0.5199873	0.6563807	0.6117212
[23,]	49	0.6166667	0.5129510	0.6445571	0.5991234
[24,]	51	0.6000000	0.4991628	0.6208110	0.5743964
[25,]	52	0.5833333	0.4924084	0.6089078	0.5622814
[26,]	53	0.5666667	0.4857453	0.5969969	0.5503401
[27,]	54	0.5500000	0.4791724	0.5850877	0.5385775
[28,]	55	0.5333333	0.4726884	0.5731893	0.5269978
[29,]	57	0.5166667	0.4599825	0.5494600	0.5044001
[30,]	58	0.5000000	0.4537582	0.5376464	0.4933874
[31,]	59	0.4833333	0.4476182	0.5258780	0.4825677
[32,]	60	0.4666667	0.4415612	0.5141627	0.4719423
[33,]	62	0.4500000	0.4296920	0.4909231	0.4512770
[34,]	63	0.4333333	0.4238776	0.4794137	0.4412373
[35,]	64	0.4166667	0.4181418	0.4679875	0.4313924
[36,]	65	0.4000000	0.4124837	0.4566514	0.4217416
[37,]	66	0.3833333	0.4069021	0.4454120	0.4122838
[38,]	69	0.3666667	0.3906065	0.4123360	0.3850544
[39,]	71	0.3500000	0.3801070	0.3908781	0.3678372
[40,]	75	0.3333333	0.3599470	0.3495667	0.3355699
[41,]	76	0.3166667	0.3550764	0.3395986	0.3279400

Continuação da tabela 3.5

[42,]	77	0.3000000	0.3502716	0.3297819	0.3204797
[43,]	79	0.2833333	0.3408563	0.3106162	0.3060563
[44,]	83	0.2666667	0.3227781	0.2742306	0.2791188
[45,]	85	0.2500000	0.3141018	0.2570449	0.2665582
[46,]	87	0.2333333	0.3056587	0.2405464	0.2545719
[47,]	89	0.2166667	0.2974426	0.2247424	0.2431367
[48,]	91	0.2000000	0.2894473	0.2096362	0.2322299
[49,]	96	0.1833333	0.2703868	0.1749167	0.2071284
[50,]	99	0.1666667	0.2595583	0.1561453	0.1934454

Fonte: Zarzar, Jr., 2007 - Software R

Onde:

time = tempo de falha

st = valores calculados pelo modelo de Kaplan-Meier

ste = valores calculados pelo modelo Exponencial

stw = valores calculados pelo modelo Weibull

stln = valores calculados pelo modelo Log-normal

Os valores das expressões acima, são as estimativas de máxima verossimilhança dos parâmetros de cada um dos modelos. A estimativa de $R_{ln}(t)$, por exemplo, foi obtido no soft R, a partir das estimativas de μ e σ , em $R_w(t)$, α e γ e no exponencial α .

O cálculo das estimativas dos tempos de sobrevivência, significa que a probabilidade de uma construção ou um componente construtivo sobreviver acima de 10 anos, é de 0,983 para o estimador de Kaplan-Meier, 0,873 para o modelo exponencial, 0,983 para o modelo Weibull e 0,997 para o modelo Log-normal. Observa-se que os valores das probabilidades dos modelos Weibull e Log-normal, estão bem mais próximos do valor da probabilidade do estimador de Kaplan-Meier, o que significa que os modelos Weibull e Log-normal se ajustam melhor aos dados coletados, constantes dos dados estimados (Zazar, Jr., 2007).

O valor destas funções para $t = 51$ anos pelos modelos de Weibull e Log-normal são bem próximos, ou seja o ajuste de ambos os modelos estima que a probabilidade de um componente após 51 anos de uso é cerca de aproximadamente 60%. O valor estimado pelo modelo exponencial é de apenas 50%, esta abaixo dos outros dois.

O modelo Exponencial parece não ser adequado para estes dados, pois se diferenciam de forma significativa dos valores obtidos pelo estimador de Kaplan-Meier.

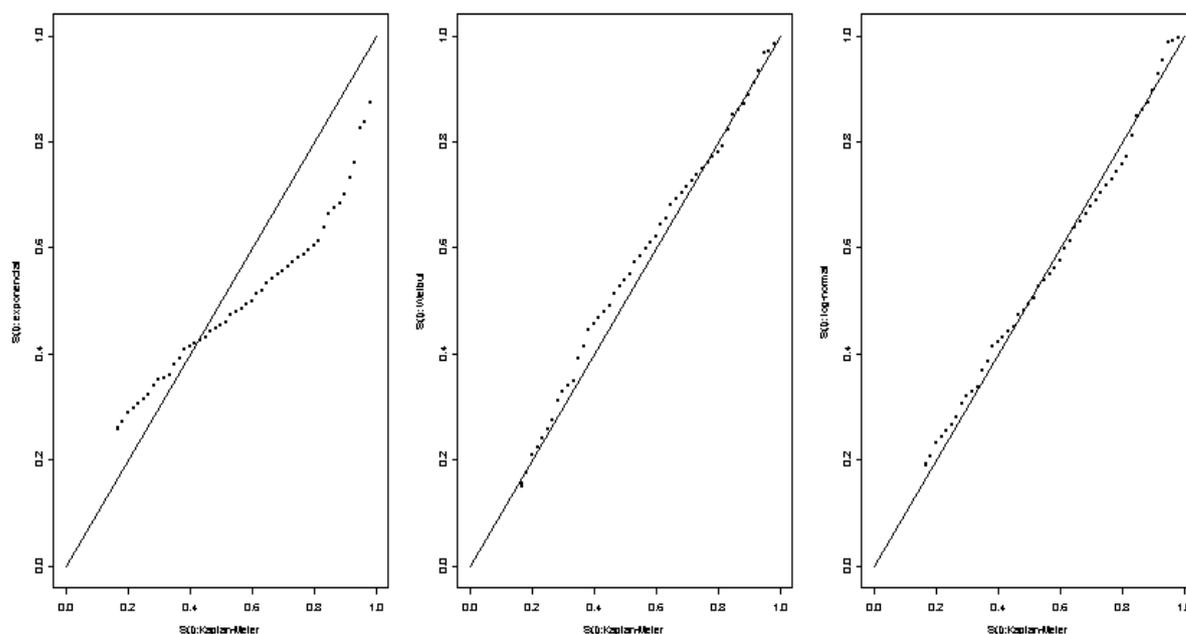


Figura 3.14 - Gráficos das sobrevivências estimadas por Kaplan-Meier versus as sobrevivências estimadas pelos modelos Exponencial, Weibull e Log-normal

Por este método, o “melhor” modelo será aquele cujos pontos no gráfico se apresentem alinhados em torno de uma linha reta diagonal. Observa-se visualmente nos gráficos acima, que o modelo Exponencial parece ser o que tem os pontos no gráfico mais distanciados em relação a linha reta diagonal e o modelo Log-normal é o que parece ser o mais adequado, é o modelo que melhor se ajusta aos dados, pois é o que tem os pontos que mais se aproximam da linha diagonal. O modelo Kaplan-Meier, representado no eixo dos (x) pela linha reta diagonal, é o modelo que melhor representa a função de confiabilidade porque é uma adaptação da função de confiabilidade empírica.

A Figura 3.15 mostra, também para uma comparação os gráfico dos tempos de falha dos modelos Kaplan-Meier, Exponencial, Weibull e Log-normal

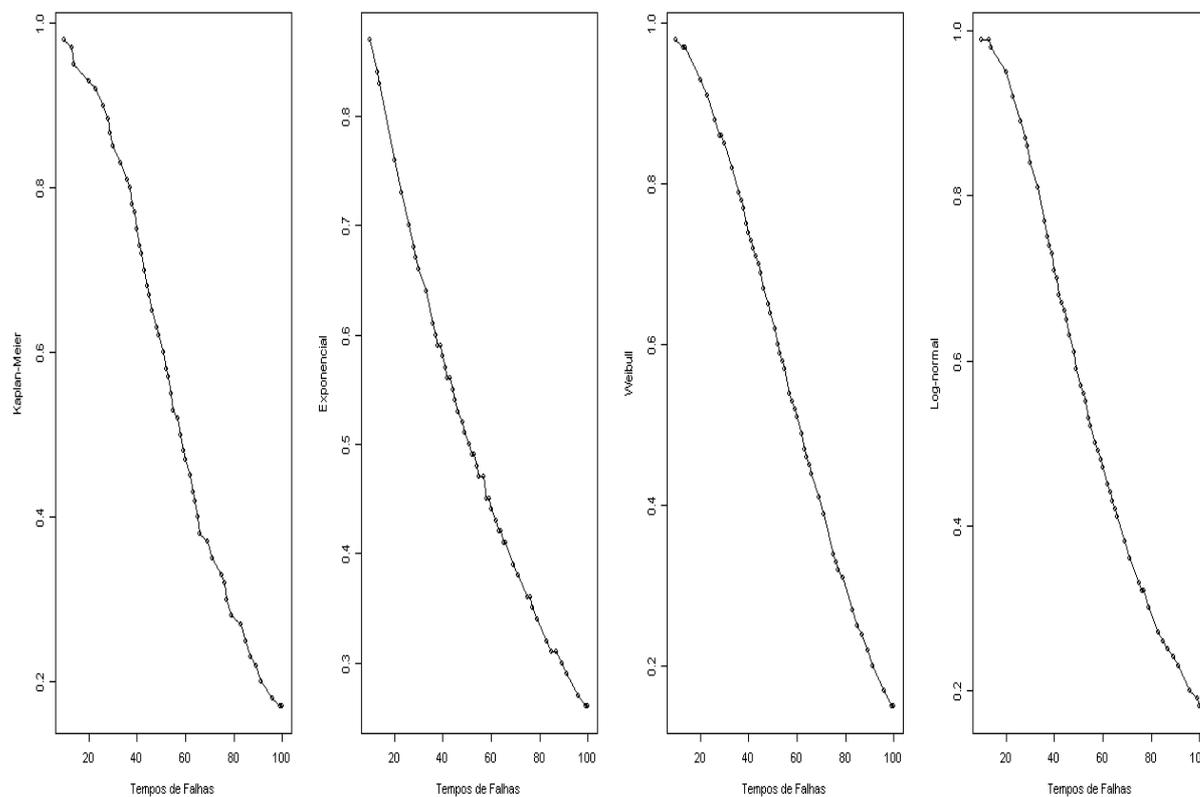


Figura 3.15 – Gráfico dos tempos VS modelos Kaplan-Meier, Exponencial, Weibull e Log-normal

Resumo MTTF

Exponencial = 73,4 anos

Weibull = 64,9 anos

Log-normal = 70 anos

Existe uma certa variação entre as medias dos modelos apresentados, sendo a maior dela a Exponencial. Para o modelo de Weibull, é usado a função gama nos cálculos.

3.14 Teste de adequação

Um teste de adequação do modelo, consiste em calcular uma estatística teste sob a hipótese de que o modelo é adequado e em obter uma probabilidade que reflita a plausibilidade desta hipótese. Se esta probabilidade for pequena, (usualmente menor que 0,5), o modelo não deve ser aceito como adequado para os dados. Caso contrário o modelo deve ser aceito. O teste de qui-quadrado é certamente o mais conhecido para verificar a adequação de modelos. No entanto, este teste não é o mais indicado para dados de durabilidade pela possível presença de censuras e também por demandar um número grande de falhas nem sempre presentes nestes estudos.

O teste a seguir foi proposto por Hollander e Proschan (1979). A estatística teste para a hipótese de que os dados são provenientes da distribuição com função de confiabilidade $R_o(t)$ é dada por:

$$C = \sum_{i=1}^k R_o(t)g(t_i), \quad (4.38)$$

onde, a soma é feita somente para os tempos de falha ($k \leq n$ é o número de falhas) e $g(t_i)$ é a altura dos saltos da estimativa de Kaplan-Meier entre observações consecutivas não-censuradas, e $R_o(t) = R_{exp}$ para a exponencial, R_w para a Weibull e R_{ln} para a Log-normal.. Logo $C =$ soma (das alturas dos saltos da estimativa de Kaplan-Meier), vezes as probabilidades dos componentes continuarem em operação para cada tempo t). Sob a hipótese de que os dados amostrais são provenientes da distribuição $R_o(t)$, a estatística

$$C^* = \frac{\sqrt{n}(C - 0,5)}{\sigma} \quad (4.39)$$

segue aproximadamente uma distribuição Normal padrão (média igual a zero e variância igual a um), com

$$\sigma^2 = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{n}{n-i+1} \left[R_0^4(t_{(i-1)}) - R_0^4(t_i) \right] \right\} \quad (4.39)$$

onde $t(i)$ é o tempo de ordem t , onde os tempos observados encontram-se em ordem crescente.

Utiliza-se a tabela da distribuição Normal para calcular as probabilidade,

$$Y = P(|C^*| > x) = P(C^* > x) + P(C^* < -x); \quad (4.40)$$

Se o valor encontrado para a probabilidade y for “pequena” ou seja menor que 0,5, então deve-se rejeitar a hipótese de que os dados amostrais são provenientes da distribuição candidata, cuja função de confiabilidade é $R_0(t)$. Caso contrário, a distribuição candidata é aceita ($y > 0,5$).

A lógica para realização do teste é a seguinte: considerando que é conhecido os tempos de falhas, calcula-se as probabilidades pelo método de Kaplan-Meier, em seguida encontra-se os saltos, as funções de confiabilidade, e o desvio padrão. De posse desses dados, calcula-se C^* (4.39) e substitui na fórmula (4.40). O modelo que apresentar a maior probabilidade, será o modelo candidato ao melhor ajuste.

Para os dados da tabela 1, foi encontrado os valores das distribuições exponencial, a seguir e os cálculos constam no ANEXO 3

Resumo dos cálculos para o teste de adequação da Exponencial

$$C = 0,4622 ; \quad \sigma = 0,268 ; \quad C^* = 1,098$$

$$Y = P(|C| > 1,098) = P(C^* > 1,098) + P(C^* < -1,098) = 2P(C^* > 1,098)$$

$$= 2(0,1379) = 0,2758$$

Resumo dos cálculos para o teste de adequação da distribuição de Weibull

$$C = 0,5165 \quad ; \quad \sigma = 0,289 \quad ; \quad C^* = 0,43$$

$$Y = P(|C| > 0,43) = P(C^* > 0,43) + P(C^* < -0,43) = 2P(C^* > 0,43) =$$

$$= 0,6672$$

Resumo dos cálculos para o teste de adequação da distribuição log-normal

$$C = 0,5069 \quad ; \quad \sigma = 0,282 \quad ; \quad C^* = 0,19$$

$$Y = P(|C| > 0,19) = P(C^* > 0,19) + P(C^* < -0,19) = 2P(C^* > 0,19) =$$

$$= 0,8494$$

Calculadas as probabilidades dos três modelos, o que indica, desta forma, a não-rejeição dos modelos de Weibull e Log-normal. Estes resultados vêm confirmar a conclusão obtida através das técnicas gráficas, onde o modelo Log-normal foi o mais significativo. Caso os três modelos apresentassem $P(|C^*| > X)$ maior que 50%, seriam aceitos como modelos que se ajustariam aos dados, mas, o que representar maior probabilidade acima de 50%, será entre os três modelos, uma indicação do modelo ao melhor ajuste.

Tabela 3.6 - Resultado das probabilidades encontradas nos Testes de Adequação para os modelos Exponencial, Weibull e Log-normal.

P(C* > P)	Exponencial	Weibul	Log-normal
	0,2758	0,6672	0,8494

A estimativa para o tempo médio ou MTTF com base nesse modelo é calculada a partir da expressão da sua média :

$$E(t) = \exp \left[3,97 + \left(\frac{0,82^2}{2} \right) \right] = 74,2 \text{ anos}$$

CAPÍTULO 4

4.1 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

4.1.1 CONCLUSÕES

Os modelos de probabilidade analisados (Exponencial, Weibull e Log-normal) permitem concluir ser possível através da técnica de Análise de Sobrevivência, com valores censurados, estimar a vida útil de um componente ou sistema construtivo,

Chegou-se ainda a conclusão de que através do método gráfico e do teste de Hollander e Proschan (1979)., o modelo probabilístico que melhor se ajustou aos dados amostrais foi o modelo Log-normal..

A análise de sobrevivência, largamente empregada na estimativa de vida de seres biológicos, pode ser estendida para a estimativa de vida de componentes mecânicos.

Com os modelos apresentados, é possível se fazer uma comparação dos resultados aqui encontrados com dados observados

Contudo, verificou-se que a consistência dos métodos, calculados e testados, foram evidenciados e que algum componente ou sistema construtivo que falharam, poderiam ter sido estimadas as probabilidades de tempo de vida útil, dispondo-se os tempos observados de falha, provando assim a potencialidade dos métodos.

4.1.2 SUGESTÕES

A técnica empregada pode ser utilizada em trabalhos futuros, dando outros enfoques no conceito de vida útil, tal como componentes que desenvolvam trabalhos repetitivos, onde o fenômeno que define a vida útil é a fadiga. É importante que se tenha os dados observados ou se inicie a criação de um banco de dados desses componentes que farão parte do estudo e tiveram falhas parciais ou totais e das possíveis causas ou patologia decorrentes.

Sugere-se ainda a divulgação do software R, como poderosa ferramenta para análise estatística que envolve essas questões.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 6118: projetos de estruturas de concreto .Rio de Janeiro, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide to Durable Concrete Detroit-USA, Manual of Concrete practice, 1991. ACI201. 2R 77).

ANDRADE, Tibério, Concreto: Ensino, Pesquisa e realizações / ed. G.C.Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2005.

COLOSIMO, E. A., & FREITAS, M. A , Confiabilidade: Análise de tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados, Fundação Cristiano Otoni, Belo Horizonte, 1997

COLOSIMO, E.A. & GIOLO, S.R, Ed. Edgar Blucher, São Paulo, 2006 2006

GASPAR, P.L., BRITO,J.Tipos de Vida Útil das Construções. PATORREB, 2009, p.301-308

HELENE, P.R. L.,. Vida Útil das estruturas de Concreto, In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. Anais Porto Alegre, RS. 1997

HELENE, P. R. L. et. al. Inspeção e diagnóstico dos apoios e dos Blocos de Fundação da Ponte Paulo Guerra. Relatório Técnico – Prefeitura da Cidade do Recife, Recife,PE, 2002 –

HELENE, P.R.L.,- Artigo publicado no Ibracon – Vida Útil das Estruturas de Concreto - Internet

HOLLANDER, M. e PROSCHAN, F. (1979). „Testing to determine the underlying distribution randomly censored”Biometric,35,393-401.

ISSO 15686 – 2001- Buildings and constructedassets- Service life planning

ISO 2000, Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles. I 15686-1.

ISO 2001, Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 2: Service Life Predict procedures. ISO 15686-2.

LIMA, M. G. Concreto: Ensino, Pesquisa e realizações / ed. G.C.Isaia. – São Paulo:

MEEKER, W. Q.; ESCOBAR, L. A Statistical Methods for Reliability Data., New York: John Wily and Sons, 1998. 1998

MEHTA, P.K: & MONTEIRO, P.J.M, 1999 Concreto : Estrutura, Propriedades e Materiais – São paulo Pini,1994

MONTGOMERY, Douglas, C; RUNGER, George C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. Editora LTC, 2ª. ed. Rio de Janeiro, 2003..

NEVILLE, A. M, Propriedades do Concreto – 2ª. ed. São Paulo, Pini, 1997

NELSON, W. 1990. Acelerated Testing, Statical Models, Test Plans and Data analysis , New York: Wiley

PETRUCCI, Eladio G. R. Concreto de cimento portland. 13. ed. São Paulo, Globo, 1998

SILVA, P. F.A.; DEJANIKIAN, J.G, Durabilidade das Estruturas do Concreto Aparente em Atmosfera Urbana, São Paulo Pini, 1995

SOUZA,V.C. M, & RIPPER, Thomaz, Patologia, Recuperação e Reforço, de estruturas de Concreto, Pini, São Paulo, 2005.

ZARZAR, Jr., Fuad, C. Metodologia para Estimar a Vida Útil de Elementos Construtivos, Baseados no Método dos Fatores – Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007

APÊNDICE A

Cálculos para o teste de adequação para o Modelo Exponencial

KM	g	Ro = exp	g x Ro(exp)	Ro(exp) ⁴	N _(i-1 + 1)	σ^2_{exp}
0,983	0,017	0,873	0,0145	0,5799	60	0,4201
0,967	0,017	0,838	0,0140	0,4924	59	0,0889
0,950	0,017	0,826	0,0138	0,4663	58	0,0270
0,933	0,017	0,761	0,0127	0,3362	57	0,1369
0,917	0,017	0,731	0,0122	0,2855	56	0,0543
0,900	0,017	0,702	0,0117	0,2425	55	0,0470
0,883	0,017	0,683	0,0114	0,2174	54	0,0278
0,867	0,017	0,674	0,0112	0,2059	53	0,0131
0,850	0,017	0,665	0,0111	0,1950	52	0,0126
0,833	0,017	0,638	0,0106	0,1656	51	0,0346
0,817	0,017	0,612	0,0102	0,1406	50	0,0300
0,800	0,017	0,604	0,0101	0,1331	49	0,0091
0,783	0,017	0,596	0,0099	0,1261	48	0,0088
0,767	0,017	0,588	0,0098	0,1194	47	0,0085
0,750	0,017	0,580	0,0097	0,1131	46	0,0083
0,733	0,017	0,572	0,0095	0,1071	45	0,0080
0,717	0,017	0,564	0,0094	0,1014	44	0,0077
0,700	0,017	0,557	0,0093	0,0960	43	0,0075
0,683	0,017	0,549	0,0092	0,0909	42	0,0073
0,667	0,017	0,542	0,0090	0,0861	41	0,0071
0,650	0,017	0,650	0,0108	0,1785	40	-0,1386
0,633	0,017	0,520	0,0087	0,0731	39	0,1621
0,617	0,017	0,513	0,0085	0,0692	38	0,0061
0,600	0,017	0,499	0,0083	0,0621	37	0,0116
0,583	0,017	0,492	0,0082	0,0588	36	0,0055
0,567	0,017	0,486	0,0081	0,0557	35	0,0053
0,550	0,017	0,479	0,0080	0,0527	34	0,0052
0,533	0,017	0,473	0,0079	0,0499	33	0,0051
0,517	0,017	0,460	0,0077	0,0448	32	0,0097
0,500	0,017	0,454	0,0076	0,0424	31	0,0046
0,483	0,017	0,448	0,0075	0,0401	30	0,0045
0,467	0,017	0,442	0,0074	0,0380	29	0,0044
0,450	0,017	0,430	0,0072	0,0341	28	0,0084
0,433	0,017	0,424	0,0071	0,0323	27	0,0040
0,417	0,017	0,418	0,0070	0,0306	26	0,0040
0,400	0,017	0,412	0,0069	0,0289	25	0,0039
0,383	0,017	0,407	0,0068	0,0274	24	0,0038
0,367	0,017	0,391	0,0065	0,0233	23	0,0108

0,350	0,017	0,380	0,0063	0,0209	22	0,0066
0,333	0,017	0,360	0,0060	0,0168	21	0,0117
0,317	0,017	0,355	0,0059	0,0159	20	0,0027
0,300	0,017	0,350	0,0058	0,0151	19	0,0027
0,283	0,017	0,341	0,0057	0,0135	18	0,0052
0,267	0,017	0,323	0,0054	0,0109	17	0,0093
0,250	0,017	0,314	0,0052	0,0097	16	0,0042
0,233	0,017	0,306	0,0051	0,0087	15	0,0040
0,217	0,017	0,297	0,0050	0,0078	14	0,0039
0,200	0,017	0,289	0,0048	0,0070	13	0,0037
0,183	0,017	0,270	0,0045	0,0053	12	0,0084
0,167	0,167	0,260	0,0433	0,0045	11	0,0044
			0,4622			1,1518

APÊNDICE B

Cálculos para o teste de adequação da distribuição de Weibull

KM	G	Ro=(w)	gxRo(w)	Ro(w)^4	N _(i-1+1)	$\sigma^2(w)$
0,983	0,017	0,983	0,0164	0,935	60	0,065
0,967	0,017	0,971	0,0162	0,891	59	0,045
0,950	0,017	0,967	0,0161	0,874	58	0,017
0,933	0,017	0,932	0,0155	0,756	57	0,124
0,917	0,017	0,911	0,0152	0,689	56	0,072
0,900	0,017	0,887	0,0148	0,619	55	0,076
0,883	0,017	0,870	0,0145	0,572	54	0,052
0,867	0,017	0,861	0,0143	0,549	53	0,026
0,850	0,017	0,852	0,0142	0,526	52	0,027
0,833	0,017	0,823	0,0137	0,458	51	0,080
0,817	0,017	0,792	0,0132	0,393	50	0,078
0,800	0,017	0,781	0,0130	0,372	49	0,025
0,783	0,017	0,770	0,0128	0,352	48	0,025
0,767	0,017	0,760	0,0127	0,333	47	0,025
0,750	0,017	0,748	0,0125	0,314	46	0,025
0,733	0,017	0,737	0,0123	0,296	45	0,024
0,717	0,017	0,726	0,0121	0,278	44	0,024
0,700	0,017	0,715	0,0119	0,261	43	0,024
0,683	0,017	0,703	0,0117	0,244	42	0,023
0,667	0,017	0,692	0,0115	0,229	41	0,023
0,650	0,017	0,680	0,0113	0,214	40	0,023
0,633	0,017	0,656	0,0109	0,186	39	0,043
0,617	0,017	0,645	0,0107	0,173	38	0,021
0,600	0,017	0,621	0,0103	0,149	37	0,039
0,583	0,017	0,609	0,0101	0,137	36	0,018
0,567	0,017	0,597	0,0099	0,127	35	0,018
0,550	0,017	0,585	0,0098	0,117	34	0,017
0,533	0,017	0,573	0,0096	0,108	33	0,017
0,517	0,017	0,549	0,0092	0,091	32	0,031
0,500	0,017	0,538	0,0090	0,084	31	0,015
0,483	0,017	0,526	0,0088	0,076	30	0,014
0,467	0,017	0,514	0,0086	0,070	29	0,014
0,450	0,017	0,491	0,0082	0,058	28	0,025
0,433	0,017	0,479	0,0080	0,053	27	0,012
0,417	0,017	0,468	0,0078	0,048	26	0,011
0,400	0,017	0,457	0,0076	0,043	25	0,011
0,383	0,017	0,445	0,0074	0,039	24	0,010
0,367	0,017	0,412	0,0069	0,029	23	0,027

0,350	0,017	0,391	0,0065	0,023	22	0,015
0,333	0,017	0,350	0,0058	0,015	21	0,024
0,317	0,017	0,340	0,0057	0,013	20	0,005
0,300	0,017	0,330	0,0055	0,012	19	0,005
0,283	0,017	0,311	0,0052	0,009	18	0,008
0,267	0,017	0,274	0,0046	0,006	17	0,013
0,250	0,017	0,257	0,0043	0,004	16	0,005
0,233	0,017	0,241	0,0040	0,003	15	0,004
0,217	0,017	0,225	0,0037	0,003	14	0,003
0,200	0,017	0,210	0,0035	0,002	13	0,003
0,183	0,017	0,175	0,0029	0,001	12	0,005
0,167	0,167	0,156	0,0260	0,001	11	0,002
			0,5165			1,340

APÊNDICE C

Cálculos para o teste de adequação para o modelo log-normal

KM	G	Ro=(ln)	gxRo(ln)	Ro(ln) ⁴	N _(i-1+1)	σ ² (ln)
0,983	0,017	0,997	0,0166	0,989	60	0,011
0,967	0,017	0,991	0,0165	0,964	59	0,025
0,950	0,017	0,987	0,0165	0,951	58	0,013
0,933	0,017	0,953	0,0159	0,824	57	0,131
0,917	0,017	0,927	0,0154	0,737	56	0,092
0,900	0,017	0,896	0,0149	0,643	55	0,101
0,883	0,017	0,873	0,0145	0,580	54	0,069
0,867	0,017	0,861	0,0143	0,549	53	0,035
0,850	0,017	0,848	0,0141	0,518	52	0,035
0,833	0,017	0,810	0,0135	0,431	51	0,101
0,817	0,017	0,770	0,0128	0,352	50	0,092
0,800	0,017	0,757	0,0126	0,329	49	0,029
0,783	0,017	0,744	0,0124	0,306	48	0,028
0,767	0,017	0,730	0,0122	0,284	47	0,027
0,750	0,017	0,717	0,0119	0,264	46	0,026
0,733	0,017	0,703	0,0117	0,245	45	0,025
0,717	0,017	0,690	0,0115	0,227	44	0,024
0,700	0,017	0,677	0,0113	0,210	43	0,023
0,683	0,017	0,663	0,0111	0,194	42	0,022
0,667	0,017	0,650	0,0108	0,179	41	0,021
0,650	0,017	0,637	0,0106	0,165	40	0,020
0,633	0,017	0,612	0,0102	0,140	39	0,037
0,617	0,017	0,599	0,0100	0,129	38	0,017
0,600	0,017	0,574	0,0096	0,109	37	0,032
0,583	0,017	0,562	0,0094	0,100	36	0,014
0,567	0,017	0,550	0,0092	0,092	35	0,014
0,550	0,017	0,539	0,0090	0,084	34	0,013
0,533	0,017	0,527	0,0088	0,077	33	0,012
0,517	0,017	0,504	0,0084	0,065	32	0,023
0,500	0,017	0,493	0,0082	0,059	31	0,010
0,483	0,017	0,483	0,0080	0,054	30	0,010
0,467	0,017	0,472	0,0079	0,050	29	0,009
0,450	0,017	0,451	0,0075	0,041	28	0,017
0,433	0,017	0,441	0,0074	0,038	27	0,008
0,417	0,017	0,431	0,0072	0,035	26	0,007
0,400	0,017	0,422	0,0070	0,032	25	0,007
0,383	0,017	0,412	0,0069	0,029	24	0,007
0,367	0,017	0,385	0,0064	0,022	23	0,017

KM	G	Ro=(ln)	gxRo(ln)	Ro(ln) ⁴	N _(i-1+1)	σ ² (ln)
0,350	0,017	0,368	0,0061	0,018	22	0,010
0,333	0,017	0,336	0,0056	0,013	21	0,015
0,317	0,017	0,328	0,0055	0,012	20	0,003
0,300	0,017	0,320	0,0053	0,011	19	0,003
0,283	0,017	0,306	0,0051	0,009	18	0,006
0,267	0,017	0,279	0,0047	0,006	17	0,009
0,250	0,017	0,267	0,0044	0,005	16	0,004
0,233	0,017	0,255	0,0042	0,004	15	0,003
0,217	0,017	0,243	0,0041	0,003	14	0,003
0,200	0,017	0,232	0,0039	0,003	13	0,003
0,183	0,017	0,207	0,0035	0,002	12	0,005
0,167	0,167	0,193	0,0322	0,001	11	0,002
			0,5069			1,269

APÊNDICE D

Valores calculados para a Função de Confiança dos componentes

20	0,951051
22,5	0,926327
25	0,897604
27,5	0,865386
30	0,830188
32,5	0,792531
35	0,752933
37,5	0,711903
40	0,669932
42,5	0,627489
45	0,585012
47,5	0,542903
50	0,501528
52,5	0,461207
55	0,422219
57,5	0,384798
60	0,349136
62,5	0,315377
65	0,283631
67,5	0,253964
70	0,22641
72,5	0,200971
75	0,177621
77,5	0,156309
80	0,136966
82,5	0,119505
85	0,103827
87,5	0,089825
90	0,077383
92,5	0,066385
95	0,056712
97,5	0,048246
100	0,040873

APÊNDICE E

Determinação de α e γ

Então, pode-se construir a seguinte tabela:

T	F(t) Freq. Relat. Acum.	$Y = \text{Ln}\{-\text{Ln}[1-F(t)]\}$	$X = \text{Ln}(t - t_0)$ $t_0 = 10$ anos
20	0,06	-2,7826	2,3026
30	0,16	-1,7467	2,9957
40	0,28	-1,1132	3,4012
50	0,42	-0,6075	3,6889
60	0,60	0,0874	3,9120
70	0,76	0,3557	4,0943
80	0,88	0,7515	4,2485
90	0,96	1,1690	4,3820
100	1,00	----	---

Agora aplicando a regressão linear para determinar " α " e " γ "

Ordem	Y_i	X_i	Y_i^2	X_i^2	$X_i \times Y_i$
1	-2,7826	2,3026	7,7429	5,3020	-6,4072
2	-1,7467	2,9957	3,0510	8,9742	-5,2326
3	-1,1132	3,4012	1,2392	11,5682	-3,7862
4	-0,6075	3,6889	0,3691	13,6080	-2,2410
5	0,0874	3,912	0,0076	15,3037	0,3419
6	0,3557	4,0943	0,1265	16,7633	1,4563
7	0,7515	4,2485	0,5648	18,0498	3,1927
8	1,1690	4,3820	1,3666	19,2019	5,1226
Σ	-3,8864	29,0252	14,4676	108,7710	-7,5535

Valores obtidos pelo R para a função de confiança de weibull

APÊNDICE F

Software R

R é uma linguagem e ambiente para computação estatística e gráfica. É similar à linguagem e ambiente S desenvolvida no Bell Laboratories por Jonh Chambers e colaboradores.

R fornece uma ampla variedade de técnicas estatísticas (modelagem linear e não linear, testes estatísticos clássicos, análise de séries temporais, classificação, agrupamento, ...) e gráficos, e é altamente extensível. A linguagem S é muitas vezes o veículo de escolha para pesquisa em metodologia estatística, e R fornece uma rota Open Source para participação naquela atividade.

Um dos pontos fortes de R é a facilidade com que gráficos bem-desenhados com qualidade para publicação podem ser produzidos, incluindo símbolos matemáticos e fórmulas quando necessário. Muitos cuidados têm sido feitos sobre as definições padrão para as menores escolhas em desenho, entretanto o usuário retém controle total

Ele se presta a diversas funções, desde uma calculadora científica, passando pela integração e derivação de funções matemáticas, até a realização de complexas análises estatísticas.

Além disso, o R também apresenta uma série de recursos gráficos que permitem a descrição detalhada de todos os aspectos que se pode querer personalizar em um gráfico, como cor, tipo e tamanho da letra, símbolos, títulos e sub-títulos, pontos, linhas, legendas, planos de fundo e muito mais.

R é disponível como Software Livre sob os termos da Licença Pública Geral GNU da Free Software Foundation na forma de código fonte. Ela compila e funciona em uma

grande variedade de plataformas UNIX e sistemas similares (incluindo FreeBSD e Linux). Ele compila e funciona em Windows 9x/NT/2000 e MacOS.

O ambiente R

R é um conjunto integrado de facilidades de software para manipulação de dados, cálculo e visualização gráfica.. Ele inclui

- uma facilidade efetiva para manipulação e armazenagem de dados,
- um conjunto de operadores para cálculos sobre quadros de dados, em particular as matrizes,
- uma grande e coerente coleção integrada de ferramentas intermediárias para análise de dados,
- facilidades gráficas para análise de dados e visualização na tela ou impressa,
- uma linguagem de programação bem desenvolvida, simples e efetiva que inclui condicionais, alças, funções recursivas definidas pelo usuário, e facilidades para entrada e saída.

O termo “ambiente” pretende caracterizar R como um sistema totalmente planejado e coerente, em vez de uma aglomeração de ferramentas muito específicas e inflexíveis, como é o caso com outros softwares de análise de dados.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

O R é uma linguagem e ambiente estatístico que traz muitas vantagens para o usuário, embora que estas nem sempre sejam óbvias no início. Primeiro, é um Software Livre (livre no sentido de liberdade) distribuído sob a Licença Pública Geral (http://www.fsf.org/pt_home.html) e pode ser livremente copiado e distribuído entre usuários, bem como pode ser instalado em diversos computadores livremente. Isso contraste com pacotes comerciais que têm licenças altamente restritivas e não permitem que sejam feitas cópias ou que seja instalado em mais de um computador sem a devida licença (e pagamento, claro!). Segundo, a grande maioria de Softwares livres são grátis e R não é uma exceção.

Isso contrasta com os pacotes comerciais. Terceiro, sendo um Software Livre, os códigos fontes do R estão disponíveis e atualmente são gerenciados por um grupo chamado o *Core Development Team* (<http://r-project.org/contributors>). A vantagem de ter o código aberto é que falhas podem ser detectadas e corrigidas rapidamente e atualizações para Softwares Livres podem ser disponibilizadas em uma questão de dias. Essa sistema de revisão depende pesadamente da participação dos usuários. Em contraste, em muitos pacotes comerciais, as falhas não são corrigidas até o próximo lançamento que pode levar vários anos. Quarta, R fornece um interface de entrada por linha de comando (ELC). Todos os comandos são digitados e o *mouse* é pouco usado. Pode parecer “antigo” ou até “pobre em recursos visuais”, mas aí há o melhor recurso do R, a sua flexibilidade. Para usuários, a linguagem da R se torna clara e simples e a flexibilidade da ELC permite que uns poucos comandos simples sejam juntados para criar funções poderosas. Além disso a transparência das funções e a entrada de dados é altamente didática. O usuário é sempre consciente do que foi pedido através da ELC. Isso contraste com outros pacotes em que uma interface bonita e sofisticada pode esconder a dinâmica dos cálculos, e potencialmente pode esconder erros. Finalmente, R é disponível para muitas plataformas incluindo Unix, Linux, Macintosh e Windows.

Embora seja possível baixar e compilar os códigos fontes para instalar R no seu sistema, a maioria de usuários optam para a via mais fácil de instalar R através de arquivos binários ou executáveis.


```
Meier", ylab="S(t):Weibull")  
lines(c(0,1),c(0,1),type="l",lty=1)  
plot(st,ste,pch=16,ylim=range(c(0.0,1)),xlim=range(c(0,1)),xlab="S(t):Kaplan-  
Meier",ylab="S(t):log-normal")  
lines(c(0,1),c(0,1),type="l",lty=1)
```

APÊNDICE 8

Significado dos comandos do pacote Survival no software R

riquere(survival)	Pacote do R para o calculo de confiabilidade
dados	60 valores coletados na amostra
censdados	Valores censurados
Ajust1	Calcula coeficientes da distribuição Exponencial
alfa	Calcula o valor de escala da distribuição Exponencial;
Ajust2	Calcula coeficientes da distribuição de Weibull
alfa	Calcula o parâmetro de escala da distribuição de weibull
gama	Calcula o parâmetro de forma da distribuição de Weibull
Ajust3	Calcula os coeficientes da distribuição log-normal
ste	Calculas as probabilidades da distribuição exponencial
stw	Calcula as probabilidades da distribuição de Weibull
stln	Calcula as probabilidades da distribuição log-normal
cbind	Agrupa os tempos com as probabilidades das distribuições calculadas
Par	Inicia a construção do gráfico
plot	Plota os valores no gráfico
Par(mfrow=c(1.3))	Coloca 3 gráficos em uma mesma tela
lines	Insera uma linha de 45 graus na diagonal do gráfico
type = "o"	Une os pontos no gráfico
Lwd = 1	Largura da linha no gráfico