

FACULDADE DE ENGENHARIA  
Programa de Pós-graduação

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**Fernanda Ribeiro Jordão**

**CARACTERIZAÇÃO DE VARIÁVEIS QUE  
INFLUENCIAM NA VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE  
CONCRETO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Área de Concentração: Engenharia das Estruturas.

**Orientador: Prof. Dr. Turibio José da Silva**

Uberlândia, 28 de agosto de 2006.

*In memoriam*

*Ao meu Pai...*

# AGRADECIMENTOS

---

Agradeço primeiramente a Deus pela minha existência e por me oportunizar com mais esta conquista.

A minha mãe Marina, por ser um exemplo de vida, de amor à família e ao trabalho, obrigada por ter dedicado toda sua vida a mim e ao Renato e por ter me guiado sempre...

Ao meu irmão Renato pelo incentivo e apoio, e por tantas vezes sair de Araguari para me buscar, pois estava tarde, obrigada.

Ao Rogério, pelo amor, confiança, dedicação e incentivo a cada dia, sempre acreditando “vai dar tudo certo, calma”. Obrigada por tudo, amo você.

Ao meu orientador Prof Turibio, serei eternamente grata pelos ensinamentos e por tanta dedicação... Tive durante as orientações um verdadeiro exemplo de mestre, possuidor de uma imensa inteligência e conhecimento, e ainda assim uma competência e paciência ímpares na arte de ensinar.

Aos professores por todos os ensinamentos, colegas da pós – graduação pelo companheirismo e todos os funcionários da FECIV, em especial a Sussu por sua disponibilidade em ajudar-nos seja qual for o motivo, sempre com um sorriso amigo e uma palavra de esperança.

A todos aqueles que de forma direta ou indireta me ajudaram a chegar à reta final.

Jordão, F. R. Caracterização de variáveis que influenciam na vida útil das estruturas de concreto. 150 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

## RESUMO

---

A análise da vida útil das estruturas de concreto armado deve contemplar processos probabilísticos devido a aleatoriedade dos parâmetros que influenciam nos mecanismos que afetam a vida da estrutura. Nesses processos, além da aplicação de técnicas de confiabilidade estrutural, é necessária a caracterização das variáveis que influenciam nos mecanismos de deterioração. O objetivo geral do trabalho é analisar variáveis relacionadas à previsão de vida útil das estruturas de concreto, particularmente de edifícios residenciais, em regiões urbanas distantes da costa marítima, desde um ponto de vista do comportamento probabilístico, propondo funções de densidade de probabilidade e parâmetros estatísticos representativos. Para tal, foi realizado o levantamento de dados em quatro edifícios residenciais e em órgãos ambientais. Posteriormente foi feita a análise estatística dos mesmos realizando-se o ajuste de funções contínuas de densidades de probabilidade, mediante o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov. As variáveis estudadas foram a temperatura, a umidade relativa, as concentrações de dióxido de carbono na atmosfera, o peso dos móveis e de pessoas e a área de ocupação dos móveis no ambiente. Como resultados, foram encontrados que as variáveis temperatura e umidade relativa, para a cidade de Uberlândia, pode ser adotada uma função de densidade normal de probabilidade, com média 22,8°C e desvio padrão de 4,4°C para a temperatura e média de 65,06% e desvio padrão de 17,15% para a umidade relativa. Para a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera urbana da cidade de São Paulo, resultou uma função de densidade log - normal de probabilidade com média 1083 ppm e desvio padrão de 168 ppm. Para a variável de sobrecarga: peso do usuário (pessoas) os valores encontrados foram 0,74 kN e desvio padrão de 0,13 kN, com uma função de densidade normal de probabilidade. Para o peso do mobiliário a função ajustada foi a normal com média de 0,22 kN/m<sup>2</sup> e desvio padrão de 0,15 kN/m<sup>2</sup>. Os resultados obtidos serão importantes para o estudo da vida útil de estruturas de concreto armado e se constituem em uma primeira base de dados regional.

**Palavras-chave:** Vida útil - Durabilidade - Deterioração - Cargas Variáveis - Concreto.

Jordão, F. R. Characterization of variables that influence in the service life of the concrete structures. 150 p. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2006.

## ABSTRACT

---

The analysis of the service life of the structures of reinforced concrete should contemplate probabilistic processes due to the random of the parameters that influence in the mechanisms that affect the life of the structure. In these processes, besides the application of structural reliability techniques, it is necessary the characterization of the variables that influence in the deterioration mechanisms. The main objective of this work is to analyze variables related to the forecast of service life of the concrete structures, particularly of residential buildings, in urban areas far from the marine coast, from a point of view of the probabilistic behavior and propose functions of density of probability and representative statistical parameters. To get that, it was carried out a data survey in four residential buildings and in environmental organs. Later it was made the statistical analysis of them and the adjustment of continuous functions of densities of probability, by the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test. The studied variables were the temperature, the relative humidity, the concentration of carbon dioxide in the atmosphere, the weight of people and the furniture and the area of occupation of the furniture. As results, it was found out that to the temperature and relative humidity variables, for the city of Uberlândia, a function of normal density of probability can be adopted, with an average of 22,8°C and a standard deviation of 4,4°C for the temperature and an average of 65,06% and a standard deviation of 17,15% for the relative humidity. For the CO<sub>2</sub> concentration in the urban atmosphere of the city of São Paulo, it resulted in a density function of log – normal of probability with an average of 1083 ppm and a standard deviation of 168 ppm. For the live loads variable: weigh of the people the found values were 0,74 kN and standard deviation of 0,13 kN, with a function of normal density of probability. For the weight of the furniture the adjusted function was the normal with average of 0,22 kN/m<sup>2</sup> and standard deviation of 0,15 kN/m<sup>2</sup>. The obtained results will be important for the study of the service life of reinforced concrete structures and they are constituted in a first regional base of data.

**Key words:** service life; durability; deterioration; live loads; concrete,

# SÍMBOLOS E SIGLAS

---

## SÍMBOLOS

### Letras Romanas

a/c	-	Relação água / cimento
Ca(OH) <sub>2</sub>	-	Hidróxido de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	-	Carbonato de cálcio
Cl <sup>-</sup>	-	Íon cloreto
CO	-	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	-	Dióxido de Carbono
COV	-	Coefficiente de variação
COV(P <sub>f</sub> )	-	Coefficiente de variação da probabilidade falha
F.D.P.	-	Função densidade de probabilidade
F <sub>k</sub>	-	Valor característico das solicitações
F <sub>qk</sub>	-	Valor característico das ações variáveis
fQ <sub>qp</sub>	-	Densidade de probabilidade da componente quase permanente
F(t)	-	Função que representa falha do componente
F <sub>X</sub> ( <b>x</b> )	-	Função de distribuição acumulada
f <sub>X</sub> ( <b>x</b> )	-	Função densidade de probabilidade em comum das variáveis X1, X2, ... , Xn
g( <b>x</b> )	-	Função que representa o estado limite entre falha e segurança de um determinado sistema
H <sub>2</sub> O	-	Água
k	-	Constante da reação
KOH	-	Hidróxido de potássio
n	-	Total de números simulados
N	-	Número de observações
NaOH	-	Hidróxido de sódio



$n_f$	-	Total de números simulados que falharam
$NO_x$	-	Óxidos de nitrogênio
$O_2$	-	Oxigênio
$P_f$	-	Probabilidade de falha de um elemento ou de um sistema
pH	-	Potencial hidrogenionte
$P_s$	-	Probabilidade de segurança de um elemento ou de um sistema
ppm	-	Partícula por milhão
ppmpv	-	Parte por milhão por volume
$Q_{qp}$	-	Componente quase permanente das cargas de utilização
$r_i$	-	Conjunto de números aleatórios uniformemente distribuídos
$r_1$	-	Taxa de corrosão á temperatura T
$r_0$	-	Taxa de corrosão á temperatura $T_0$
$R(t)$	-	Complemento da confiabilidade do componente
$SO_2$	-	Dióxido de enxofre
T, $T_0$	-	Temperatura absoluta em °K
U.R.	-	Umidade Relativa
$X_i$	-	Valores de variáveis
$x_i$	-	Variáveis aleatórias básicas

### **Letras Gregas**

	-	Índice de confiabilidade
$f$	-	Coeficiente de ponderação das ações
$f_1$	-	Considera o desvio das ações em relação aos seus valores característicos
$f_2$	-	Fator que leva em conta a combinação das ações
$f_3$	-	Fator que considera possíveis erros na avaliação dos efeitos das ações
G	-	Coeficiente de ponderação das ações permanentes de projeto
${}_0F_k$	-	Valor reduzido de combinação
	-	Função densidade de probabilidade normal
	-	Desvio padrão

## **SIGLAS**

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	-	American Society for Test and Materials
CCE	-	Comisión de las Comunidades Europeas
CEB	-	Comitê Euro-Internacional Du Betón
CETESB		Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CST	-	Companhia Siderúrgica Tubarão
FORM	-	First Order Reliability Method
FOSM	-	First Order Second Moment
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	-	Instituto Nacional de Metereologia
IPCC	-	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
NASA	-	National Aeronautics and Space Administration
NBR	-	Norma Brasileira Regulamentada
OECD	-	Organisation for Economic Co-operation and Development
OMS	-	Organização Mundial de Saúde
PNAD	-	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
SORM	-	Second Order Reliability Method

## **Unidades de medidas**

°C	-	graus Celsius
cm	-	centímetro
cm <sup>2</sup>	-	centímetro quadrado
kN	-	quilo Newton
m	-	metro
m <sup>2</sup>	-	metro quadrado
m <sup>3</sup>	-	metro cúbico
mm	-	milímetro
MPa	-	mega Pascal
ppm	-	partes por milhão

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1 Possíveis formas de degradação das estruturas (Van Der Toorn, 1992).....	09
Figura 2.2 Vida Útil das estruturas (Helene, 1993).....	10
Figura 2.3 Fluxograma representativo de um projeto através de uma abordagem probabilística (Andrade, 2005).....	15
Figuras 3.1 Modelagem das sobrecargas - componentes quase permanentes.....	22
Figura 4.1 Representação gráfica da função de estado limite para um espaço bidimensional.....	35
Figura 4.2 Representação do índice de confiabilidade de Cornell.....	35
Figura 4.3 Incertezas existentes na análise de confiabilidade (Melchers, 1987).....	36
Figura 4.4 Relação entre o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha.....	41
Figura 4.5 Representação esquemática da perda de funcionalidade <i>versus</i> índice de confiabilidade [adaptado de Tuutti (1982)].....	41
Figura 4.6 Método de transformação inversa para a geração das variáveis aleatórias (Melchers, 1987).....	45
Figura 4.7 Representação gráfica dos estados de falha e segurança (Ang e Tang, 1984).....	47
Figura 4.8 Relação entre o número de simulações, o tempo de processamento e a variabilidade da probabilidade de falha (Andrade, 2001).....	51
Figura 5.1 Modelo de vida útil de Tuutti (1982).....	57
Figura 5.2 Carbonatação do concreto (CSIC, 1989 apud Da Silva 1998).....	58
Figura 5.3 Representação esquemática do percurso de difusão do CO <sub>2</sub> no concreto (Tuutti, 1982).....	59
Figura 5.4 Modelo simplificado para a carbonatação do concreto (Schiessl, 1983).....	61
Figura 5.5 Influência das variáveis no modelo de Tuutti (1982).....	64

Figura 5.6 Influência das variáveis no modelo de Bob e Bob (1991).....	66
Figura 5.7 Influência das variáveis no modelo de Morinaga (1990).....	67
Figura 5.8 Influência das variáveis no modelo de Schiessl (1976).....	69
Figura 6.1 Representação esquemática da evolução da carbonatação componentes estruturais submetidos a ambientes interiores e a ambientes ciclos de molhagem e secagem (Helene, 1993).....	73
Figura 6.2 Influência da temperatura na agressividade ambiental referida ao cobrimento de concreto (Helene, 1993).....	75
Figura 6.3 Gráfico climatológico da Temperatura do Ar (°C) no dia 21/12/2003.....	79
Figura 6.4 Alterações da temperatura na superfície da Terra entre 1951-1993.....	80
Figura 6.5 Alterações da temperatura na superfície da Terra entre 1851-1997.....	81
Figura 6.6 Gráfico climatológico da temperatura média mensal de Brasília e Belo Horizonte de 1961-1990.....	81
Figura 6.7 Gráfico climatológico da temperatura máxima mensal de Brasília e Belo Horizonte de 1961-1990.....	82
Figura 6.8 Gráfico climatológico da temperatura mínima mensal de Brasília e Belo Horizonte de 1961-1990.....	82
Figura 6.9 Variação da concentração de CO <sub>2</sub> (média mensal) na atmosfera de 1958 a 1991.....	84
Figura 6.10 Aumento das concentrações de CO <sub>2</sub> na atmosfera (em partículas por milhão).....	85
Figura 6.11 Aumento das concentrações de CO <sub>2</sub> na atmosfera (dados obtidos da Figura 6.10) com curva de regressão.....	86
Figura 6.12 Concentração de CO <sub>2</sub> de acordo com a modificação de alturas.....	87
Figura 6.13 Concentração de CO <sub>2</sub> de acordo com a hora/local (altura a partir do solo).....	88
Figura 6.14 Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> na atmosfera Baldasano (1996) apud Da Silva (1998).....	89
Figura 6.15 Evolução da concentração média de CO <sub>2</sub> na atmosfera UNEP (1994) apud Da Silva (1998).....	90

Figura 6.16 Teor de umidade dos poros do concreto em função da umidade do ambiente (Andrade, 1992).....	91
Figura 6.17 Modelo simplificado do fenômeno da troca de umidade entre o cobrimento do concreto e o meio ambiente (Andrade, 1992).....	92
Figura 6.18 Influência da umidade relativa na velocidade da carbonatação (Tuutti, 1982).....	94
Figura 6.19 Umidade Relativa (média mensal) em Brasília e Belo Horizonte no período de 1961-1990.....	94
Figura 6.20 Umidade Relativa (média mensal) em Belo Horizonte no período de 1931-1960.....	95
Figura 6.21 Domicílios urbanos brasileiros, total e sua respectiva distribuição.....	99
Figura 6.22 Condições de Ocupação, no período de 2001-2004.....	100
Figura 6.23 Domicílios com Bens Duráveis (2001-2004).....	100
Figura 7.1 Curva de distribuição dos dados de temperatura no período de 1998 - 2005.	104
Figura 7.2 Histograma da temperatura no período de 1998 - 2005 com função normal ajustada.....	104
Figura 7.3 Temperatura Média de Uberlândia-MG no período de 1998 a 2005.....	105
Figura 7.4 Temperatura Média mensal de Uberlândia-MG e Vitória-ES no ano de 1998.....	105
Figura 7.5 Temperatura Média mensal de Uberlândia-MG e Vitória-ES no ano de 1999.....	105
Figura 7.6 Temperatura Média mensal de Uberlândia-MG e São Paulo-SP no ano de 2005.....	106
Figura 7.7 Curva de distribuição dos dados de Umidade relativa 1998 - 2005.....	108
Figura 7.8 Histograma da Umidade Relativa no período de 1998 - 2005 com função normal ajustada.....	108
Figura 7.9 Umidade Relativa Média anual no período de 1998 a 2005.....	109
Figura 7.10 Umidade Relativa de Uberlândia-MG e São Paulo no ano de 2005.....	109
Figura 7.11 Curva de distribuição dos dados de concentração de CO <sub>2</sub> no período de 1997 - 2005.....	112

Figura 7.12 Histograma da concentração de CO <sub>2</sub> no período de 1997 - 2005 com função log - normal ajustada.....	112
Figura 7.13 Procedimento adotado para pesagem dos móveis (a) geladeira (b) fogão (c) microondas (d) mesa de centro.....	114
Figura 7.14 Balança Baskara, carga máxima 130 quilos.....	114
Figura 7.15 Curva de distribuição dos dados de peso dos móveis.....	116
Figura 7.16 Histograma do peso dos móveis com função normal ajustada.....	116
Figura 7.17 Curva de distribuição dos dados de peso das pessoas dos 4 edifícios.....	119
Figura 7.18 Histograma do peso das pessoas dos 4 edifícios com função normal ajustada.....	119
Figura 7.19 Curva de distribuição dos dados complementares para o peso das pessoas.	120
Figura 7.20 Histograma dos dados complementares de peso das pessoas com função normal ajustada.....	120

# ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 3.1 Valores mínimos das cargas verticais.....	21
Tabela 3.2 Resultados experimentais da carga por área de ocupação dos móveis.....	24
Tabela 3.3 Resultados experimentais da taxa de ocupação dos móveis.....	24
Tabela 4.1 Alguns exemplos de distribuições estatísticas (Ang e Tang, 1984; Elsayed, 1996 apud Figueiredo, 2004).....	40
Tabela 4.2 Índice de confiabilidade <i>versus</i> probabilidade de falha (Ang e Tang, 1984; Melchers, 1987).....	40
Tabela 4.3 Propriedades estatísticas das variáveis proposta por Siemes et al (1985).....	49
Tabela 4.4 Variabilidade da relação <i>a/c</i> para vários tipos de concreto (Da Silva, 1998).....	49
Tabela 4.5 Propriedades estatísticas das variáveis proposta por Gomes (1997).....	50
Tabela 4.6 Probabilidades de falha associadas as diferentes exigências de desempenho (Siemes et al, 1985).....	53
Tabela 5.1 Intervalo das variáveis comuns nos modelos de previsão.....	62
Tabela 5.2 Variáveis e valores determinados através do modelo de Tuutti (1982).....	64
Tabela 5.3 Variáveis e valores determinados através do modelo de Bob e Bob, 1991 apud Da Silva 1998.....	65
Tabela 5.4 Variáveis e valores determinados através do modelo de Morinaga, 1990 apud Da Silva 1998.....	67
Tabela 5.5 Variáveis e valores determinados através do modelo de Schiessl (1983).....	68
Tabela 5.6 Expressões para determinação da constante K (constante de carbonatação).....	69
Tabela 6.1 Umidade Relativa Média Compensada em Uberlândia-MG (1997-2004).....	95

Tabela 6.2 Distribuição Regional de domicílios, pessoas e números médio de pessoas, por domicílio, dormitório e localização do domicílio.....	98
Tabela 7.1 Comparação entre a Temperatura Média e Desvio-padrão para medições horárias e a cada 6 horas para a cidade de Vitória-ES.....	103
Tabela 7.2 Caracterização Probabilística da Temperatura da cidade de Uberlândia-MG....	103
Tabela 7.3 Resultados Estatísticos da Umidade Relativa para a cidade de Uberlândia-MG.....	107
Tabela 7.4 Concentração de CO <sub>2</sub> em São Paulo - SP (1997 - 2005).....	111
Tabela 7.5 Resultados experimentais da carga dos móveis pela área útil do ambiente.....	115
Tabela 7.6 Resultados experimentais da carga por área de ocupação dos móveis.....	117
Tabela 7.7 Resultados experimentais da taxa de ocupação dos móveis.....	117
Tabela 7.8 Resultados experimentais do peso das pessoas.....	118



# SUMÁRIO

---

<b>1. Introdução.....</b>	<b>01</b>
1.1 Relevância do Tema.....	01
1.2 Objetivo da Pesquisa.....	04
1.3 Apresentação do Trabalho.....	04
<b>2. Vida Útil e Durabilidade das Estruturas de Concreto.....</b>	<b>06</b>
2.1 Vida Útil de Estruturas de Concreto.....	06
2.2 Métodos para Determinar a Vida Útil das Estruturas.....	11
2.2.1 Com base nas experiências anteriores.....	11
2.2.2 Com base em ensaios acelerados.....	12
2.2.3 Métodos prescritivos considerando mecanismos específicos de degradação.....	12
2.2.4 Abordagem Determinística.....	12
2.2.5 Abordagem Probabilística.....	13
2.3 Durabilidade das Estruturas.....	15
<b>3. Cargas em Edifícios.....</b>	<b>18</b>
3.1 Tipo de Cargas.....	18
3.1.1 Cargas Permanentes.....	19
3.1.2 Cargas Acidentais.....	20
3.2 Combinação de Cargas.....	25
3.3 Coeficientes de Ponderação das Ações.....	27

<b>4. Técnicas de Confiabilidade Estrutural.....</b>	<b>29</b>
4.1 Introdução.....	29
4.2 Análise de Confiabilidade Estrutural.....	32
4.2.1 Incertezas existentes na Análise de Confiabilidade.....	36
4.2.1.1 Incertezas no Processo de Tomada de Decisão.....	37
4.2.1.2 Incertezas Fenomenológicas.....	37
4.2.1.3 Incertezas na Modelagem.....	37
4.2.1.4 Incertezas na Predição do Instante de Falha.....	37
4.2.1.5 Incertezas Físicas.....	38
4.2.1.6 Incertezas Estatísticas.....	38
4.2.1.7 Incertezas Relacionadas à Falhas Humanas.....	38
4.2.2 Variáveis Aleatórias e Funções de Probabilidade.....	39
4.2.3 Simulação de Monte Carlo.....	43
4.2.3.1 Geração de Números Aleatórios.....	44
4.2.3.2 Geração das Variáveis Aleatórias.....	45
4.2.3.3 Determinação da Função Densidade de Probabilidade e da Probabilidade de Falha.....	46
4.3 Análise Estatística das Variáveis.....	48
4.4 Análise da Probabilidade de Falha.....	50
4.4.1 Número de simulações realizadas.....	50
4.4.2 Definição da probabilidade de falha.....	52
<b>5. Modelos Matemáticos de Previsão de Vida Útil.....</b>	<b>54</b>
5.1 Introdução.....	54
5.2 Mecanismos de degradação.....	55
5.2.1 Ação do CO <sub>2</sub> no concreto.....	59
5.3 Análise dos Coeficientes das Variáveis dos Modelos.....	62
5.3.1 Modelo de K. Tuutti.....	63
5.3.2 Modelo de C. Bob.....	65
5.3.3 Modelo de S. Morinaga.....	66
5.3.4 Modelo de P. Schiessl.....	68
5.3.5 Outros estudos.....	69

<b>6. Estudos Existentes das Variáveis.....</b>	<b>70</b>
6.1 Introdução.....	70
6.2 Variáveis Ambientais.....	71
6.2.1 Temperatura.....	72
6.2.1.1 Influência da Temperatura nos Mecanismos de Deterioração.....	72
6.2.1.2 Informações sobre Temperatura.....	78
6.2.2 Concentração de CO <sub>2</sub> .....	83
6.2.2.1 Informações sobre a Concentração de CO <sub>2</sub> .....	84
6.2.2.2 Valores de Concentração de CO <sub>2</sub> utilizados por pesquisadores.....	88
6.2.3 Umidade Relativa.....	90
6.2.3.1 Influência da Umidade Relativa nos Processos de Deterioração.....	91
6.2.3.2 Informações sobre a Umidade Relativa.....	94
6.3 Fatores que afetam a Sobrecarga.....	96
<b>7. Obtenção e Análise de dados.....</b>	<b>101</b>
7.1 Metodologia.....	101
7.2 Temperatura.....	102
7.3 Umidade Relativa.....	107
7.4 Concentração de CO <sub>2</sub> .....	110
7.5 Sobrecarga.....	113
7.5.1 Peso dos Móveis.....	113
7.5.1.1 Carga dos Móveis pela Área Útil do Ambiente.....	115
7.5.1.2 Carga por Área de Ocupação dos Móveis.....	116
7.5.1.3 Taxa de Ocupação dos Móveis.....	117
7.5.2 Peso das Pessoas.....	117
7.5.3 Comparação das Cargas Verticais obtidas com os Valores da NBR 6120..	121
<b>8. Conclusão e Trabalhos Futuros.....</b>	<b>123</b>
8.1 Conclusão.....	123
8.2 Sugestões de Trabalhos Futuros.....	125
8.2.1 Variáveis Ambientais.....	126

Concentração de CO <sub>2</sub> .....	126
Temperatura e Umidade Relativa.....	126
8.2.2 Variáveis de Sobrecarga.....	126
Peso dos Móveis.....	126
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>128</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

No desenvolvimento das técnicas construtivas baseadas no uso do concreto a partir de seus primórdios, percebe-se que a condução deste processo deslocou-se, ao longo do século XIX, progressivamente do âmbito da prática para o âmbito da ciência.

Os primeiros passos desta caminhada foram dados por pessoas que, em seus esforços de melhorar o novo material e/ou descobrir-lhe características de comportamento mais importantes, baseavam-se principalmente na intuição e em sua experiência prática. À medida que se avançou para o fim do século XIX, no entanto, o conhecimento do concreto tornou-se mais e mais dependente de métodos científicos de observação e de pesquisa.

O aprofundamento e a ampliação do conhecimento dos materiais em si (do cimento, do concreto e do concreto armado) apoiaram-se preferencialmente na química, matemática e física que forneceram o instrumental para análise, concepção e dimensionamento de elementos e estruturas portantes executadas com aqueles materiais. No Brasil a maioria das estruturas de concreto armado é recente, grande parte tem idade média inferior a 40 anos, portanto as patologias ainda não se manifestaram.

Devido ao conhecimento dos problemas das estruturas detectados em outros países com edifícios mais antigos, a análise da vida útil das estruturas sofreu um grande avanço nos últimos tempos.

O interesse, que atualmente é conhecido sobre a previsão da vida útil das estruturas de concreto armado e os campos relacionados com esta, pode ser constatado através da grande quantidade de congressos e seminários que acontecem sobre durabilidade, patologia, inspeção, recuperação e corrosão das armaduras no concreto armado. A norma NBR 6118 (ABNT, 2003), em consonância com o meio técnico, introduziu texto específico sobre as bases de projeto para durabilidade das estruturas.

Para Souza e Ripper (1998), existem dois conceitos cuja associação é inevitável: vida útil e durabilidade. Conhecidas ou estimadas, as características de deterioração do material concreto e dos sistemas estruturais, assim, entende-se como durabilidade o parâmetro que relaciona a aplicação destas características a uma determinada construção, individualizando-a pela avaliação da resposta que dará aos efeitos da agressividade ambiental, e definindo, então, a vida útil da mesma.

As publicações sobre previsão de vida útil apontam para a utilização de métodos probabilísticos, alguns dos quais utilizam técnicas de confiabilidade estrutural aplicadas a modelos matemáticos de deterioração. Os modelos têm por finalidade representar o mecanismo de deterioração e devem conter os parâmetros mais representativos do fenômeno.

Outro ponto importante neste tipo de método é que as variáveis de geometria, mecânicas, físicas, ambientais, ações e outras que participam do processo de deterioração devem ser tratadas como variáveis aleatórias, ou seja, devem ter uma função de distribuição conhecida e os seus parâmetros de definição, determinados a partir de dados obtidos para a estrutura.

De acordo com Da Silva (1998), uma das maiores dificuldades que é vista no estudo da vida útil das estruturas de concreto, e talvez a que mais tem contribuído para retardar a aplicação efetiva de métodos probabilísticos, reside na caracterização estatística das

variáveis básicas. Isto ocorre pela dificuldade de obter dados suficientes para caracterizar estas variáveis e conseqüentemente alcançar o objetivo desejado. Este fato ocorre na maioria dos casos, pois os dados disponíveis não alcançam uma suficiência desejável em quantidade ou qualidade.

Assim, para minimizar este problema é necessário compilar os dados obtidos através de inspeções em edifícios, publicações de órgãos e institutos relacionadas com a meteorologia e meio ambiente, publicações científicas além de realizar novas pesquisas.

Existem vários mecanismos que podem induzir a deterioração das estruturas tais como: corrosão das armaduras, reação álcali-agregado, ataque de sulfatos, lixiviação, desgaste, etc. Dentre eles, a corrosão das armaduras tem sido responsável por uma grande parcela de estruturas deterioradas de edifícios e também aquela que causa maior preocupação da população brasileira.

Nos mecanismos de deterioração, por corrosão das armaduras, de estruturas de concreto armado de edifícios localizados em regiões afastadas da zona marinha e industrial, as variáveis ambientais: umidade relativa, concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura, são consideradas relevantes. Com o estudo destas variáveis será possível verificar o quanto elas afetam o processo de deterioração, influenciando a vida útil das estruturas de concreto.

Além das variáveis ambientais, as cargas atuantes na estrutura são responsáveis pelo estado limite último da estrutura. Entende-se por estado limite último o esgotamento da capacidade portante da estrutura, sua ocorrência determina a paralisação no todo ou em parte do uso da estrutura.

Também para a vida útil existe o estado limite de serviço que se relaciona à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e à boa utilização funcional das mesmas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos utilizados, sua ocorrência, repetição ou duração causam efeitos estruturais que são indícios de comprometimento da durabilidade da estrutura.

Na maioria dos edifícios sejam residenciais ou comerciais, as cargas acidentais ou sobrecargas são ocasionadas por pessoas e móveis. As normas de todos os países preconizam valores a serem adotados no projeto. Estes valores, em sua maioria, foram obtidos em base à experiência e tratados estatisticamente, portanto já contemplam um valor de probabilidade de ocorrência. Na avaliação da vida útil de estruturas, os valores a serem empregados devem representar a carga mais próxima da realidade, considerando também o período de retorno, que no caso da vida útil, para estruturas de concreto um dos valores de referencia é 50 anos.

Portanto, no escopo de um estudo de vida útil de estruturas de concreto armado, relacionada com a corrosão de armaduras, por métodos probabilísticos, faz-se necessário:

- 1- a abordagem dos temas referentes à vida útil e durabilidade;
- 2- técnicas de confiabilidade estrutural;
- 3- modelos matemáticos de deterioração;
- 4- variáveis ambientais tais como: temperatura, umidade relativa e concentração  $\text{CO}_2$  e as variáveis de sobrecarga como: peso de pessoas e do mobiliário.

## **1.2 OBJETIVO DA PESQUISA**

O objetivo deste trabalho é analisar as variáveis relacionadas à previsão de vida útil das estruturas de concreto para regiões afastadas da zona marinha, através da descrição probabilística, propondo funções de densidade de probabilidade e parâmetros estatísticos representativos, obtidos a partir da análise de dados, para as variáveis ambientais tais como: a concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, a umidade relativa do ar e a temperatura, e as variáveis de solicitação: peso do usuário (pessoas) e peso do mobiliário.

## **1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho apresentado é composto de oito capítulos, dispostos da seguinte forma:



---

Capítulo 1: Apresenta-se a importância dos estudos elaborados atualmente que consideram as variáveis aleatórias como fator importante na previsão de vida útil e durabilidade de estruturas de concreto, são explicados os objetivos da pesquisa e os mesmos justificados.

Capítulo 2: Faz-se abordagem sobre a vida útil e durabilidade de estruturas de concreto abrangendo conceitos de diversos autores e pelas Normas Brasileiras.

Capítulo 3: São apresentadas as conceituações de cargas permanentes e variáveis. Combinação de ações. Aborda questão da segurança das estruturas, conceitos de estados limites de serviço e de utilização.

Capítulo 4: Apresenta-se conceitos de confiabilidade, natureza das incertezas que envolvem a confiabilidade estrutural. Métodos de confiabilidade de primeira e segunda ordem: FORM (First Order Reliability Method) e FOSM (First Order Second Moment) e análise estrutural, representando a probabilidade de falha, variáveis aleatórias e função de probabilidade.

Capítulo 5: Discorre sobre modelos matemáticos de previsão de vida útil, encontrados na literatura.

Capítulo 6: São apresentadas explicações e levantamento de dados em relação as variáveis ambientais tais como: concentração de CO<sub>2</sub>, umidade relativa, temperatura e variáveis de sobrecarga (peso das pessoas e móveis).

Capítulo 7: Desenvolve a parte experimental da pesquisa e a compilação dos dados obtidos através da medição em edifícios residenciais. Apresenta-se o modelo computacional utilizado, a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos da análise.

Capítulo 8: São apresentadas as conclusões obtidas através da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

# VIDA ÚTIL E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

### 2.1 VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Na antiguidade, vários materiais naturais ou que não necessitavam de tecnologia mais apurada, foram utilizados em projetos estruturais na arquitetura e engenharia. Alguns deles, desde sua invenção até nossos dias têm sido utilizados com o fim exclusivo de fornecer à construção a necessária resistência.

Com o advento do concreto armado, e posteriormente protendido, estas tecnologias permitiram que o concreto tomasse espaço de outros materiais. Surge então a idéia de que estruturas de concreto estariam mais aptas a resistirem às ações do tempo, em relação aos demais materiais.

Devido ao seu bom comportamento às solicitações, resistindo bem à compressão, flexão e torção, decorrentes da ação conjunta do aço com o concreto e devido a sua boa resistência ao desgaste superficial e à proteção física e química que o concreto exerce sobre o aço, o concreto armado foi idealizado para uma vida útil ilimitada.

Para ter “vida eterna” é necessário que o edifício receba manutenção periódica e sistemática. Este conceito de manutenção, lamentavelmente, ainda não está completamente incorporado no meio técnico da construção civil.

É importante que os engenheiros e arquitetos conheçam os mecanismos de deterioração do concreto e os conceitos atuais de durabilidade das construções, para que as obras que utilizam o concreto de cimento Portland possam ter um desempenho satisfatório, com custos de manutenção aceitáveis, por um longo período, ou seja, uma grande vida útil.

As definições de vida útil variam em termos literais nas normas e recomendações, mas são mantidos os aspectos técnicos, uma delas é aquela durante a qual a estrutura conserva todas as características mínimas de funcionalidade, resistência e aspectos externos exigíveis.

Uma das definições mais aceita é a que: vida útil é o período de tempo depois da construção, durante o qual todas as propriedades essenciais alcançam e/ou superam o valor mínimo aceitável com uma manutenção habitual.

No texto da NBR 6118 (ABNT, 2003) a vida útil está definida como o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e construtor.

O conceito de vida útil da NBR 6118 (ABNT, 2003) aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Dessa forma, determinadas partes da estrutura podem merecer consideração especial com valor de vida útil diferente do todo.

Para Fagerlund (1983), a vida útil é a quantificação de uma durabilidade a qual considera somente a qualidade da estrutura.

Segundo Da Silva (1998), a vida útil apesar de diversos conceitos e estudos, é de difícil determinação, devido aos diversos fatores envolvidos e da aleatoriedade dos fenômenos.

A previsão de vida útil das estruturas está sendo objeto de estudo principalmente devido aos seguintes fatores:

- aumento do emprego do concreto em ambientes agressivos (como pontes e estruturas off-shore);
- grandes custos de construção, manutenção das estruturas e reabilitação;
- desenvolvimento contínuo de concretos com características diferenciadas e materiais de recuperação, não estando disponíveis dados relacionados a sua durabilidade, devido ao seu curto período de exposição nas condições de utilização.

De acordo com Souza e Ripper (1998), os tempos modernos ditaram a certeza de que o concreto, como material de construção, é instável ao longo do tempo, alterando suas propriedades físicas e químicas em função das características de seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente. Às conseqüências destes processos de alteração que venham comprometer o desempenho de uma estrutura, ou material, costuma-se chamar deterioração. Os elementos agressores são chamados de agentes de deterioração.

Os materiais ou componentes reagem de uma forma particular aos agentes de deterioração a que são submetidos, sendo a forma e velocidade de deterioração função da natureza do material ou componente e das condições de exposição aos agentes de deterioração.

O conhecimento da vida útil e da curva de deterioração de cada material ou estrutura são fatores de fundamental importância para a elaboração de projetos estruturais realistas.

De acordo com Van Der Toorn (1992), existem eventos que podem causar redução dos efeitos de processos de degradação, de acordo com a forma e a intensidade de ocorrência, estes modelos genéricos são apresentados na Figura 2.1, (ver esta figura na página seguinte).

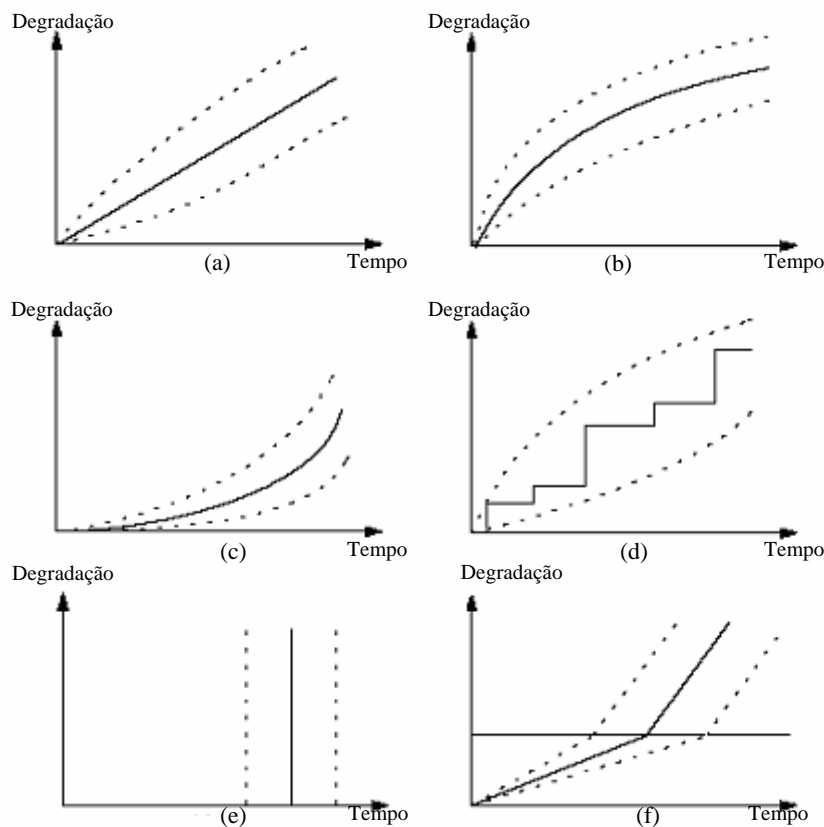
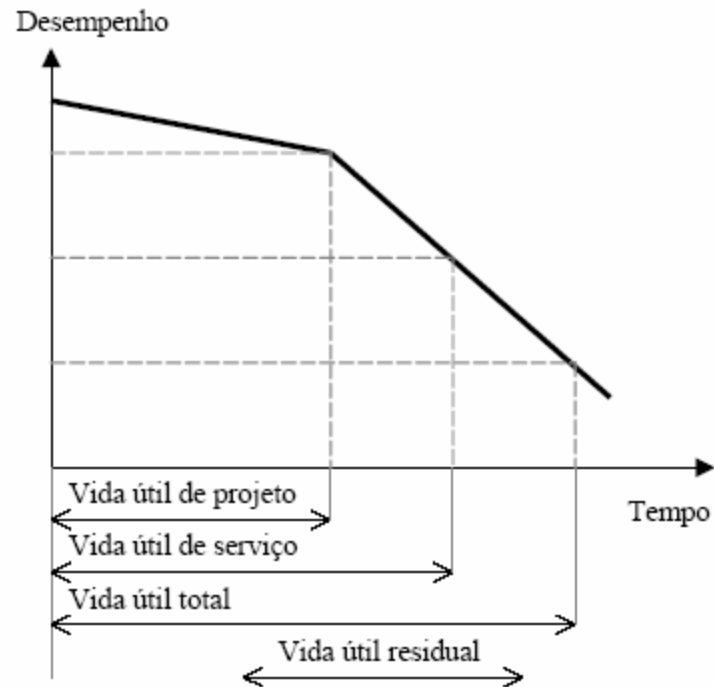


Figura 2.1 - Possíveis formas de degradação das estruturas (Van Der Toorn, 1992).

O processo linear no tempo (a) apresenta uma crescente incerteza, já que em alguns casos o processo corrosivo pode apresentar tal configuração. A penetração de cloretos e do  $\text{CO}_2$  pode ser modelada com a raiz quadrada do tempo ou com uma função de erro (b). O processo tende a acelerar com o tempo, segundo uma curva exponencial (c) para o caso de fadiga, a degradação é causada pelo efeito acumulativo das cargas. As colisões são geralmente representadas não por um processo contínuo, mas em etapas (d), representando o efeito de cargas extremas. Há ainda um caso particular (e), em que um carregamento não previsto em projeto consegue levar a estrutura ao colapso de forma súbita. O modelo (f) cujo modelo pode ser enquadrado na teoria de Tuutti (1982) representa um modelo qualitativo para a degradação ocasionada pela corrosão das armaduras.

Na concepção de Tuutti (1982), o processo de degradação é dividido em dois estágios: o de iniciação, em que ocorre a penetração dos agentes agressivos para o interior do concreto, sem causar danos efetivos ao elemento estrutural e o estágio de propagação, em que as primeiras manifestações do dano começam a ser evidenciadas na estrutura de concreto.

A partir do modelo proposto por Tuutti (1982), Helene (1993) propôs os tipos de vida útil de uma estrutura, conforme Figura 2.2.



Vida útil total (c) - esse estágio corresponde à ruptura e ao colapso parcial ou total da estrutura.

Vida útil residual (d) - corresponde ao período de tempo no qual a estrutura será capaz de desenvolver as suas funções, contado após uma vistoria e/ou intervenção.

## **2.2 MÉTODOS PARA DETERMINAR A**

### **2.2.2 COM BASE EM ENSAIOS ACELERADOS**

Este tipo de estudo para avaliação de vida útil é apresentado pela norma ASTM E 632 (1988). Os ensaios acelerados de durabilidade são realizados objetivando-se determinar um fator que relacione os resultados de degradação obtidos através de um ensaio acelerado e os resultados obtidos através da verificação da evolução do dano nos componentes quando expostos em condições naturais de envelhecimento.

### **2.2.3**



- permeabilidade;
- absorção capilar;
- difusão de gases e íons;
- migração de íons.

Na etapa de propagação podem ser aplicadas considerações relativas aos mecanismos de perda de massa no aço pela corrosão; mecanismos de corrosão dos cloretos, fissuração e consideração das equações de resistência dos materiais.

Helene (1997) comenta que nesse tipo de abordagem considera-se tanto a qualidade do concreto, traduzida pelos parâmetros relacionados ao transporte de gases, íons e líquidos através da sua rede de poros, quanto ao percurso que o agente agressivo deve percorrer até atingir a armadura em concentrações e quantidades suficientes para deteriorar a estrutura.

Deve-se, portanto, deixar claro que ao se empregar tal tipo de abordagem, não se considera a variabilidade das características do concreto e das condições ambientais nos modelos de previsão.

### **2.2.5 ABORDAGEM PROBABILÍSTICA**

Na Engenharia, muitos problemas envolvem processos naturais e fenômenos que são inerentemente aleatórios, e que certas variáveis envolvidas nos mesmos não podem ser consideradas como constantes no tempo, assim, muitos empreendimentos são realizados sob condições de incerteza.

Para Andrade (2005), no caso da previsão de vida útil de estruturas, os pesquisadores estão empregando as teorias da confiabilidade para predizer com uma maior margem de segurança como se comportará uma determinada estrutura, considerando a aleatoriedade tanto das características dos materiais empregados para a sua construção quanto das ações dos esforços e dos fatores ambientais durante uma determinada vida útil.

---

Na abordagem probabilística, os principais pontos a considerar são:

- a geometria da estrutura;
- os materiais utilizados na construção;
- o ambiente na qual a estrutura está localizada;
- a variabilidade dos parâmetros (ambientais e do concreto) envolvidos;
- a qualidade da mão-de-obra de execução do concreto;
- os principais mecanismos de degradação, especialmente corrosão;
- o planejamento das atividades de inspeção da estrutura.

O conhecimento da vida útil de um dado elemento estrutural é incerto devido às variações de geometria, características dos materiais, modo de execução e meio ambiente. Essas variáveis podem ser parcialmente avaliadas e controladas por ensaios e controle de qualidade nos vários estágios durante o período de utilização da estrutura, em que devem ser estabelecidas atividades de controle de qualidade de execução, manutenção periódica e estratégias de reparo.

Segundo Andrade (2005), este método de abordagem probabilístico pode ser representado pelo fluxograma, conforme Figura 2.3.

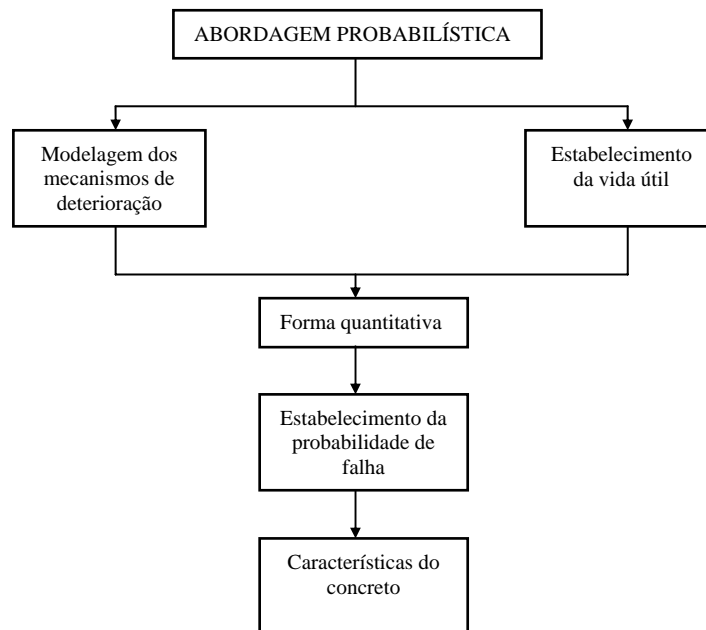


Figura 2.3 - Fluxograma representativo de um projeto através de uma abordagem probabilística (Andrade, 2005).

Para a previsão de vida útil de estruturas se faz necessária a incorporação de métodos probabilísticos para considerar as variabilidades das características do concreto e das condições ambientais nos modelos de previsão de vida útil.

Segundo Helene (1997) devem ser realizadas inspeções periódicas nas obras, com recálculos da vida útil residual, para verificação das hipóteses iniciais adotadas nos projetos.

## 2.3 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

Segundo Mehta (1994), o desempenho insatisfatório de estruturas relativamente novas exigiu que se aprofundasse o conhecimento sobre o comportamento do material para o qual era dada a ênfase apenas para a resistência adotada em projeto. A durabilidade do concreto passa então, da condição de característica secundária, à condição de critério de recebimento e aceitação da obra.

Segundo o conceito de durabilidade apresentado pelo CEB (1990), uma estrutura de concreto deve ser projetada, construída e operada de tal forma que, sob condições ambientais esperadas, ela mantenha sua segurança, funcionalidade e aparência aceitável

- a) das características químicas e físicas dos agentes agressivos, de suas concentrações na superfície do concreto e das condições ambientais.
  
- b) da microestrutura (tipo, tamanho e distribuição dos poros e presença de microfissuras).
  
- c) do grau de umidade do concreto.
  
- d) da temperatura.

Para Silva (1995), dependendo das condições climáticas e ambientais, o concreto estará submetido aos efeitos de um conjunto de agentes agressivos e diferentes fatores destrutivos. Esses agentes de deterioração podem atuar isoladamente ou conjuntamente.

Helene (1997) cita que o estudo da durabilidade evoluiu principalmente devido ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de fluidos em meios porosos, permitindo associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos.

O concreto não é indestrutível, e o resultado das interações ambientais com a sua microestrutura e conseqüentemente com suas propriedades, acarretam a mudança destas propriedades com o tempo.

## CAPÍTULO 3

# CARGAS EM EDIFÍCIOS

### 3.1 TIPOS DE CARGAS

A estrutura tem como uma de suas funções suportar e transmitir cargas de um local para outro até o solo. Existem vários tipos de cargas que podem agir em uma estrutura e essas cargas atuam de modo diferenciado nos elementos estruturais. O cálculo é a etapa de projeto que parece ser mais trabalhosa, principalmente se for necessário analisar uma estrutura já existente sem o conhecimento prévio dos materiais.

Existem três tipos principais de cargas que devem ser consideradas em edificações no território brasileiro:

- Cargas permanentes;
- Cargas variáveis;
- Cargas de vento.

Além das cargas acima, ditas primárias, as estruturas podem estar sujeitas a ações secundárias, tais como mudança de temperatura, retração, recalques de apoio, etc..

### 3.1.1 CARGAS PERMANENTES

Denominam-se cargas permanentes as que ocorrem ao longo de toda vida útil. Como o próprio nome diz, são cargas que são permanentes ou estacionárias em uma estrutura. O peso próprio normalmente é a mais importante de todas as cargas que compõem as cargas permanentes.

As cargas permanentes que atuam nos elementos estruturais dependem da densidade (ou peso específico) dos materiais utilizados. Alguns itens permanentes em planta, tais como máquinas e equipamentos de ar condicionado, também devem ser considerados como cargas permanentes.

No texto da NBR 6120 (ABNT, 1980) carga permanente é constituída pelo peso próprio da estrutura e pelo peso de todos os elementos construtivos fixos e instalações permanentes.

As cargas permanentes são cargas cuja intensidade, direção e sentido podem ser determinados com grande precisão, pois as cargas permanentes são devidas exclusivamente a forças gravitacionais, ou pesos. São exemplos de cargas permanentes:

- O peso próprio da estrutura. Para determiná-lo, basta o conhecimento das dimensões do elemento estrutural e do peso específico ( $\text{peso}/\text{m}^3$ ) do material de que é feito;
- O peso dos revestimentos de pisos, como contrapisos, pisos cerâmicos, entre outros;
- O peso das paredes. Para determiná-lo, é necessário conhecer o peso específico do material de que é feita a parede e do seu revestimento (emboço, reboco, azulejo e outros);
- O peso de revestimentos especiais, como placas de chumbo, nas paredes das salas de Raio X. Para determiná-lo, é necessário o conhecimento das dimensões e do peso específico desses revestimentos.

### 3.1.2 CARGAS ACIDENTAIS

As cargas acidentais são mais difíceis de ser determinadas, pois apresentam uma maior variabilidade além de variar com o tipo de edificação. Por isso, essas cargas são definidas por Normas, que podem variar de país para país. No Brasil, os valores das cargas acidentais são determinadas por normas como a NBR 6120 (1980) da Associação Brasileira de Normas Técnicas. São exemplos de cargas acidentais:

- O peso das pessoas;
- O peso do mobiliário;
- O peso de veículos;
- A força de frenagem de veículos;
- O peso de mobiliário especial, como cofres, que não são determinados em norma e deverá ser informado pelo fabricante.

Cargas variáveis são cargas móveis e que atuam em uma estrutura para atender a proposta de projeto. Considerando que muitas construções têm uma vida útil de pelo menos 50 anos e é muito difícil prever com exatidão as cargas que ocuparão os pisos ao longo deste período, normas nacionais existentes apresentam valores de segurança estimados para cargas que podem acontecer em pavimentos de edifícios de diferentes finalidades.

Se durante a vida útil de uma edificação, a sua finalidade mudar, por exemplo, de um edifício residencial para uma galeria de artes, é necessário verificar se todos os componentes estruturais têm resistência suficiente pra suportar as novas cargas.

De acordo com a NBR 6120 (ABNT, 1980), as ações variáveis diretas são constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção pela ação do vento, devendo-se respeitar as prescrições feitas por Normas Brasileiras específicas.

As cargas verticais que se consideram atuando nos pisos de edificações, além das que se aplicam em caráter especial referem-se a carregamentos devidos a pessoas, móveis,



utensílios e veículos, e assumidas como uniformemente distribuídas, com os valores mínimos indicados.

A NBR 6120 (ABNT, 1980) prescreve os seguintes valores para edifícios residenciais:

Tabela 3.1 - Valores mínimos das cargas verticais

VALORES MÍNIMOS PARA CARGAS VERTICAIS EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS		
LOCAL		CARGA kN/m <sup>2</sup>
Edifícios Residenciais	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro.	1,5
	Despensa, área de serviço e lavanderia.	2

Fonte: Adaptado NBR 6120 (1980).

Na NBR 8681 (ABNT, 2003) as cargas acidentais são as ações variáveis que atuam nas construções em função de seu uso (pessoas, mobiliário, veículos, materiais diversos, etc.). Consideram-se como ações variáveis as cargas acidentais das construções, bem como efeitos, tais como forças de frenagem e aceleração, de impacto e centrífugas, os efeitos do vento, das variações de temperatura, do atrito nos aparelhos de apoio. Em função de sua probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, as ações variáveis são classificadas em normais ou especiais.

Segundo Da Silva (1998), na avaliação da vida útil de estruturas, os valores para cargas acidentais a serem empregados devem representar a carga real, considerando também o período de retorno, que no caso da vida útil é de 50 anos.

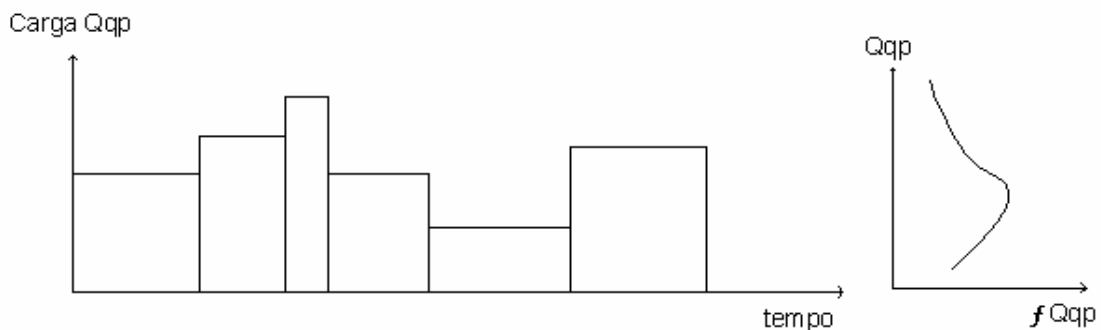
Para melhor tratar esta questão, em Corotis e Doshi (1977) são apresentados resultados de vários pesquisadores para cargas acidentais onde, para edifícios residenciais, obteve-se um valor médio de 0,673 kN/m<sup>2</sup> e desvio padrão de 0,193 kN/m<sup>2</sup> com a função normal de probabilidade sendo a de melhor ajuste.

Para Laranja e Brito (2000), as normas atuais para a segurança de estruturas, baseadas no formato semi-probabilístico de avaliação da segurança, resultante da aplicação de função

de extremo Tipo I, podem mostrar-se inadequadas quando se pretende verificar a segurança das estruturas de concreto armado existentes.

Segundo estes autores a caracterização de ações variáveis que afetam uma estrutura no tempo e no espaço é muito complexa. Nos modelos probabilísticos, que as definem, é necessário adotar hipóteses que contemplem as tendências das ações. Relativamente às ações variáveis, sobretudo as sobrecargas de utilização assumem um papel de grande importância no conjunto das variáveis atuantes na verificação da segurança das estruturas, principalmente em edifícios. Para este tipo de estruturas, as sobrecargas de uso contam com as seguintes hipóteses:

- a variabilidade das sobrecargas no tempo e no espaço é independente;
- as sobrecargas discretas são definidas por uma sobrecarga equivalente e uniformemente distribuída, desta forma, define-se o efeito da sobrecarga no pavimento e não o seu valor nominal;
- a variabilidade temporária é feita através da consideração de duas componentes: a quase-permanente que representa o valor médio da sobrecarga entre as mudanças de utilização (ocupações) e considera os equipamentos pesados, e o peso do mobiliário e das pessoas que se encontram presentes, conforme Figura 3.1.



Figuras 3.1- Modelagem das sobrecargas - componentes quase permanentes.

Fonte: Laranja e Brito (2000).

Ações variáveis normais são aquelas com probabilidade de ocorrência suficientemente grande para que sejam obrigatoriamente consideradas no projeto das estruturas de um dado tipo de construção.

Para as estruturas em que devam ser consideradas certas ações especiais, como ações sísmicas ou cargas acidentais de natureza ou intensidade especiais, elas também devem ser admitidas como ações variáveis. As combinações de ações em que comparecem ações especiais devem ser especificamente definidas para as situações especiais consideradas.

De acordo com Da Silva (1998), as sobrecargas atuantes em edifícios residenciais podem ser classificadas em dois grupos: as ocasionadas pelo peso do mobiliário e as ocasionadas pelo peso das pessoas. Segundo Páez (1982) a carga máxima por metro quadrado em habitações residenciais é indiferente do tamanho da habitação, do tipo de piso, assim como do nível social das famílias.

Corotis e Doshi (1977) apresentam a compilação de dados em edifícios obtidos através de campanhas que são levadas a sério por diversos pesquisadores. Em sua maioria os dados obtidos são relativos a edifícios de escritórios, indústrias e hospitais. Só menciona um estudo sobre edifícios residenciais, relativo a 183 casos com um total de 830 habitações. A análise destes dados resulta em uma média de  $0,544 \text{ kN/m}^2$  e desvio-padrão de  $0,193 \text{ kN/m}^2$  para as variáveis de sobrecarga (móveis e pessoas). A função de distribuição melhor ajustada segundo o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov é a normal.

A proposta apresentada por Páez (1982) para as sobrecargas de edifícios residenciais baseia-se em estudos realizados por vários estudiosos. Este estudo defende que o peso médio de um adulto é de  $0,70 \text{ kN}$  e de uma criança de  $0,35 \text{ kN}$ . A sobrecarga produzida por pessoas, obtidas mediante pesquisa de dados, tem uma média de  $0,30 \text{ kN/m}^2$  e a dispersão de  $0,15 \text{ kN/m}^2$  quando se considera um período de 10 anos.

Para Páez (1982), para um período de retorno de 100 anos, a média alcança um valor de  $0,55 \text{ kN/m}^2$ . O maior valor encontrado foi de  $1,28 \text{ kN/m}^2$ . Para o mobiliário, o valor encontrado é de  $0,24 \text{ kN/m}^2$ . Com base nestes valores, os estudiosos deduziram um valor médio de sobrecarga em edifícios residenciais de  $0,70 \text{ kN/m}^2$  e um coeficiente de variação de 0,12.

Galambos et al. (1982) propõem um coeficiente de variação de 0,25 e uma função de distribuição de extremos tipo I para as sobrecargas de uso residencial. Esta proposta se adapta a sobrecarga em função da área da habitação. Para as sobrecargas de uso em edifícios Galambos et al. (1982), recomendam para o peso de pessoas um valor de 0,75 kN. Estes apresentam também valores para o peso do mobiliário em edifícios residenciais. As cargas referentes ao mobiliário são determinadas dividindo-se o peso da mobília pela área do cômodo. A carga variável referente ao peso das pessoas é obtida através do mesmo método. O total de cargas variáveis é a soma da carga do mobiliário e o peso das pessoas residentes em cada apartamento.

Em Da Silva (1998), a definição das variáveis relacionadas a carga de mobiliário em edifícios residenciais foi obtida por dados referentes a pesquisa de 87 residências em 74 edifícios, inspecionados pelo “Centre Tècnic de Rehabilitació d’Habitatges” entre os anos de 1990 e 1993. Os edifícios situados em Barcelona e Tarragona foram construídos entre os anos de 1900 e 1980, possuem áreas de 42, 49 e 162,30 m<sup>2</sup>. As variáveis analisadas são as cargas por área de ocupação dos móveis, Tabela 3.2 e a taxa de ocupação dos móveis, Tabela 3.3.

Tabela 3.2 - Resultados experimentais da carga por área de ocupação dos móveis.

Ambiente	N	Média (kN/m <sup>2</sup> )	Desv. - Padrão (kN/m <sup>2</sup> )	COV	F.D.P	N.S.
Sala Jantar	87	0,5021	0,0814	0,16	normal	0,95
Dormitório	253	0,4391	0,0905	0,21	normal	0,05
Cozinha	87	1,2888	0,1963	0,15	normal	0,21
Banheiro	87	1,6859	0,1945	0,12	Weibull	-
Lavanderia	58	3,2390	0,9466	0,29	normal	0,01

N= Número de Observações F.D. P= Função densidade de probabilidade.  
N.S= Número de Significância

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

Tabela 3.3 - Resultados experimentais da taxa de ocupação dos móveis.

Ambiente	N	Média (kN/m <sup>2</sup> )	Desv. - Padrão (kN/m <sup>2</sup> )	COV	F.D.P	N.S.
Sala Jantar	87	0,404	0,073	0,18	log - normal	0,46
Dormitório	253	0,488	0,104	0,21	log - normal	0,71
Cozinha	87	0,542	0,117	0,21	normal	0,73
Banheiro	87	0,486	0,111	0,23	normal	0,71
Lavanderia	58	0,203	0,114	0,56	log - normal	0,98

N= Número de Observações F.D. P= Função densidade de probabilidade.  
N.S= Número de Significância

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

A combinação de cargas variáveis (peso das pessoas e do mobiliário) foi fruto de estudos dos pesquisadores (Corotis e Doshi, 1977, Galambos et al, 1982, etc.). Eles consideram que as cargas variáveis devido ao peso das pessoas e do mobiliário em edifícios residenciais podem ser representadas como uma função de distribuição uniforme. As funções de distribuição sugeridas nestes estudos são funções gama e de extremos Tipo I, onde o principal objetivo destes estudos é a determinação de um coeficiente de segurança para as cargas no estado limite ou os valores máximos para as condições em uso.

A NBR 8681 (ABNT, 2003) relata que para efeito de quantificação das ações variáveis, em lugar de considerar o período de vida efetivo dos diferentes tipos de construção e a probabilidade anual de ocorrência de cada uma das ações, admite-se o período convencional de referência, ajustando o valor característico da ação em função de seu período médio de retorno.

Para a NBR 8681 (ABNT, 2003), os valores característicos das ações variáveis, estabelecidos por consenso e indicados em normas específicas, correspondem a valores que têm de 25% a 35% da probabilidade de serem ultrapassados no sentido desfavorável, durante um período de 50 anos, o que significa que o valor característico  $F_{qk}$  é o valor com período médio de retorno de 200 anos a 140 anos respectivamente. Os valores característicos  $F_k$  das ações são estabelecidos em função da variabilidade de suas intensidades.

### **3.2 COMBINAÇÃO DE CARGAS**

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003) um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período pré-estabelecido.

Sánchez (1999) se refere ao mesmo conceito da NBR 6118 (ABNT, 2003), acreditando que estas combinações devem ser feitas de diferentes maneiras, de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura.

As ações permanentes são consideradas em sua totalidade. Das ações variáveis, são consideradas apenas as parcelas que produzam efeitos desfavoráveis para a segurança. As ações variáveis móveis devem ser consideradas em suas posições mais desfavoráveis para a segurança.

De acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2003) a aplicação de ações variáveis ao longo da estrutura pode ser feita de acordo com regras simplificadas, estabelecidas em Normas que considerem determinados tipos particulares de construção. As ações incluídas em cada uma destas ações devem ser consideradas com seus valores representativos, multiplicados pelos respectivos coeficientes de ponderação das ações.

Na mesma Norma retratam os critérios para combinações últimas, onde se deve considerar:

- ações permanentes devem figurar em todas as combinações de ações;
- ações variáveis nas combinações últimas normais, são as combinações referentes às ações provenientes do uso da estrutura, ou seja, ações permanentes e variáveis comuns da edificação. Em cada combinação última, uma das ações variáveis é considerada principal, admitindo-se que ela atue com seu valor característico  $F_k$ ; as demais ações variáveis são consideradas como secundárias, admitindo-se que elas atuem com seus valores reduzidos de combinação  $\psi_0 F_k$ ;
- ações variáveis nas combinações últimas especiais, são as combinações de ações permanentes com as ações variáveis especiais, que superam em intensidade os efeitos produzidos pelas ações variáveis comuns as edificações. Assim nas combinações últimas especiais, quando existirem, a ação variável especial deve ser considerada com seu valor representativo e as demais ações variáveis devem ser consideradas com valores correspondentes a uma probabilidade não desprezível de atuação simultânea com a ação variável especial;
- ações variáveis nas combinações últimas excepcionais, são utilizadas quando há a necessidade de considerar o efeito das ações excepcionais, ou seja, quando há a possibilidade de ocorrência de efeitos catastróficos na estrutura, como explosões,

possibilidade de abalos sísmicos e choques de máquinas ou veículos. Nas combinações últimas excepcionais, quando existirem, a ação excepcional deve ser considerada com seu valor representativo e as demais ações variáveis devem ser consideradas com valores correspondentes a uma grande probabilidade de atuação simultânea com a ação variável excepcional.

Classificação das combinações de utilização das ações em quase-permanentes, freqüentes e raras:

- As combinações quase-permanentes de utilização são aquelas que podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, da ordem da metade deste período. Têm duração de mais de seis meses.
- As combinações freqüentes de utilização são as que se repetem várias vezes durante a vida útil da estrutura. São de média duração (uma semana a seis meses).
- Já as combinações raras de utilização são as que atuam apenas algumas vezes durante a vida útil da estrutura. São de curta duração (menos de uma semana).

As ações variáveis que provocam efeitos favoráveis não são consideradas nas combinações. Admite-se que sobre a estrutura atuem apenas as parcelas de ações variáveis que produzam efeitos desfavoráveis.

### **3.3 COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO DAS AÇÕES**

Nos cálculos de estruturas, realizados de acordo com métodos semi-probabilísticos, as ações recebem um tratamento no sentido de reduzir a probabilidade de serem ultrapassadas durante a vida útil em serviço das estruturas (Páez, 1982).

O coeficiente que promove tal alteração é representado por  $\gamma_f$  e agrega em seu valor, algumas considerações feitas em relação à variabilidade das ações isoladas ou a

variabilidade de possíveis combinações de diferentes ações. Este coeficiente abrange também as incertezas referentes às solicitações calculadas a partir de modelos teóricos de comportamento estrutural. O coeficiente pode ser expresso então pela Equação 3.1:

$$\gamma_f = FUNÇÃO(\gamma_{f1}, \gamma_{f2}, \gamma_{f3}) \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

- $\gamma_f$  - Coeficiente de ponderação das ações.
- $\gamma_{f1}$  - Fator que leva em conta o desvio das ações em relação a seus valores característicos.
- $\gamma_{f2}$  - Fator que leva em conta a combinação das ações, também chamado de  $\psi_0$  pela NBR 8681 (ABNT, 2003).
- $\gamma_{f3}$  - Fator que considera possíveis erros na avaliação dos efeitos das ações, por problemas construtivos ou deficiência no método de cálculo empregado.



---

# CAPÍTULO 4

## TÉCNICAS DE CONFIABILIDADE

### ESTRUTURAL

#### 4.1 INTRODUÇÃO

No projeto estrutural, o principal objetivo está no dimensionamento de estruturas que atendam ao mesmo tempo requisitos de segurança e de economia. Muitas vezes, os requisitos de segurança não são quantificados convenientemente, diferentemente dos requisitos de economia, não sendo muito difícil encontrarem-se estruturas econômicas, mas pouco seguras, assim como estruturas muito seguras, mas pouco econômicas.

O termo confiabilidade estrutural é geralmente empregado para designar a medida de segurança de determinado sistema estrutural frente a um determinado desempenho esperado, ou seja, as chances ou propensão de determinado sistema em violar um estado limite, quer seja por falha ou por não atender a um desempenho esperado.

Obviamente, a confiabilidade estrutural está relacionada com as variáveis que descrevem o sistema estrutural, e mais precisamente com a variabilidade das mesmas. Particularmente,

esta variabilidade está presente nos sistemas estruturais sob a forma de incertezas. De acordo com Melchers (1987), estas incertezas podem ser divididas nos seguintes tipos e serão explicadas nesse capítulo:

- Incertezas físicas
- Incertezas estatísticas
- Incertezas devido a fatores humanos
- Incertezas de cunho fenomenológico
- Incertezas de modelagem

É certo que nem todas as incertezas levantadas anteriormente podem ser levadas em conta prontamente numa análise, de forma que se fala em confiabilidade “formal”, ou seja, uma confiabilidade condicionada à quantidade de incertezas adotada. Portanto, esta confiabilidade “formal” não é “exata”, fazendo apenas sentido, comparações entre confiabilidade de sistemas com mesmas incertezas. Desta forma, a avaliação da confiabilidade estrutural surge como ferramenta de comparação entre procedimentos existentes de projeto estrutural, servindo também para a avaliação da validade de regras de projeto estabelecidas em códigos de obras.

Existem vários procedimentos que são empregados para a obtenção da probabilidade de falha de um sistema. Dentre estes, os métodos de aproximação numérica, como o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (First Order Reliability Method - FORM) e o Método de Confiabilidade de Segundo Momento de Primeira Ordem (First Order Second Moment - FOSM) e os processos de simulação (Método de Simulação de Monte Carlo), são os procedimentos mais utilizados para a obtenção dos índices de confiabilidade. Além destes, existe o Método de Confiabilidade de Segunda Ordem (Second Order Reliability Method - SORM).

De acordo com vários pesquisadores os métodos probabilísticos têm sido pouco empregados na avaliação de estruturas deterioradas, apesar de serem usuais em outros ramos da engenharia. Dentro deste contexto, novas pesquisas estão procurando desenvolver técnicas que permitam modelar com um maior grau de certeza, o tempo necessário para que ocorra a despassivação das armaduras, responsável pela deterioração

de grande quantidade de estruturas devido à ação do CO<sub>2</sub> (gás carbônico) ou de íons cloretos, e para que os estados limites de serviço das estruturas sejam atingidos.

Os métodos probabilísticos podem ser empregados em conjunto com os métodos determinísticos, permitindo extrapolar os resultados para condições variadas, sendo um novo e importante método para estudo da vida útil das estruturas.

A avaliação de uma forma probabilística ocorre devido ao fato da maioria dos parâmetros envolvidos nos processos de deterioração ser de natureza aleatória, principalmente as condições ambientais. Isto requer uma grande quantidade de dados, necessários para se obter uma representação estatística confiável das distintas variáveis. Além disso, o grande número de fatores que influenciam no processo da deterioração das estruturas, em parte ainda insuficientemente conhecidos, e a complexa interação que existe entre eles, também induzem ao tratamento probabilístico.

As variáveis são caracterizadas estatisticamente e os dados necessários para a definição das variáveis básicas podem ser obtidos em inspeções, utilizando técnicas não destrutivas ou que causem pouco dano à estrutura. Partindo dessa premissa, pode-se realizar a avaliação de uma determinada estrutura, em qualquer momento de sua vida, empregando técnicas de confiabilidade estrutural associadas a modelos de deterioração.

Tradicionalmente o conceito de durabilidade e conseqüente previsão da vida útil das estruturas estão relacionados com algumas variáveis, como cobertura mínimo do concreto, máxima relação água / cimento, conteúdo mínimo de cimento, limitação da abertura da fissura, quantidade de oxigênio, tipo de cimento e o revestimento do concreto, bem como as condições climáticas do meio em que a estrutura está exposta (CEB, 1997).

Existe uma preocupação em incorporar estas variáveis, relativas à durabilidade, no projeto de estruturas de concreto, visando estabelecer de forma mais precisa os parâmetros em projeto, bem como definir períodos para manutenção das estruturas, visando aumentar ou garantir a vida útil. O estudo de confiabilidade estrutural pode ser bastante útil neste aspecto.

## 4.2 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Existem vários estudos de caráter probabilístico, que empregam as teorias da confiabilidade para a previsão da degradação de estruturas de concreto armado, e estes vêm sendo conduzidos por alguns grupos de pesquisa no mundo.

Os resultados das pesquisas realizadas sobre este tema têm como objetivo principal desenvolver análises que considerem a relação existente entre o índice de confiabilidade ( ) e os estados limites para o período de iniciação (ou vida útil de projeto) do processo corrosivo, levando-se em consideração as condições ambientais e as características do concreto.

Segundo Figueiredo (2004), os primeiros trabalhos relacionados à confiabilidade na previsão da vida útil das estruturas foram apresentados por Kraker et al., em 1982, dando início às pesquisas na área.

De acordo com Ang e Tang (1984), estes pesquisadores definem a confiabilidade como uma medida probabilística da segurança de um determinado sistema. E para Melchers (1987), a confiabilidade de um sistema pode ser admitida como o cálculo e a predição da probabilidade da não violação de um determinado estado limite característico desse sistema durante a sua vida útil.

Confiabilidade também pode ser definida como sendo a probabilidade relacionada à perfeita operação de um determinado componente durante um período de tempo especificado, usualmente chamado de vida útil, nas suas condições normais de utilização.

Para que a confiabilidade estrutural ocorra, primeiramente devem-se definir os critérios de desempenho para a estrutura. Na prática isso quer dizer que todos os estados de falha, tanto os estados limites últimos quanto os de utilização, devem ser evitados. Especificam-se, então, os períodos de tempo e os níveis de confiabilidade desejados para que os estados de falha não venham a ocorrer.

Estabelecida à função de estado limite e os níveis de desempenho desejados, pode-se definir os estados de segurança ou de falha de um elemento ou sistema. A função que representa a falha (F) do componente pode ser definida como o complemento da confiabilidade (R) do mesmo, representada pela Equação 4.1.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad \text{Equação 4.1}$$

Em outra notação, obtém-se a Equação 4.2 (Melchers, 1987).

$$P_s = 1 - P_f \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

$P_s$  - Probabilidade de segurança de um elemento ou de um sistema ( $0 < P_s < 1$ ).

$P_f$  - Probabilidade de falha de um elemento ou de um sistema ( $0 < P_f < 1$ ).

O mesmo princípio pode ser aplicado para o cálculo da probabilidade de falha quando existe mais de uma variável envolvida. Por exemplo, o desempenho de um determinado sistema em relação a um dado estado limite geralmente é descrito como uma função constituída por algumas variáveis aleatórias básicas  $X_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), que normalmente representam ações, propriedades do material, dimensão das seções transversais, entre outros parâmetros, podendo ser representadas através de pontos particulares  $x_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) conforme apresentado na Equação 4.3 (Melchers, 1987).

$$f_{\mathbf{X}(\mathbf{x})} = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

**$X_i$**  - Variáveis aleatórias básicas.

**$f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$**  - Função densidade de probabilidade conjunta das variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

Assim, a probabilidade de falha desse sistema pode ser representada pela Equação 4.4 (Melchers, 1987; Ang e Tang, 1984).

$$P_f = P[g(\mathbf{x}) \leq 0] = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde:

$g(\mathbf{x})$  = função que representa o estado limite entre falha e segurança de um determinado sistema, considerando as variáveis básicas  $X_i$ . Pode ser chamada de função de falha, função de estado limite ou função de desempenho. Quando  $g(\mathbf{x}) = 0$  indica a falha, e quando  $g(\mathbf{x}) > 0$  representa segurança do sistema.

Vale ressaltar que a falha do sistema pode ser representada por uma função  $[g(\mathbf{x})]$  ou por um determinado ponto, a partir do qual o sistema deixa de atender aos requisitos de desempenho pré-estabelecidos.

De acordo com Andrade (2001), quando a função de estado limite é dependente de apenas duas variáveis aleatórias  $[f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) = f(X_1, X_2)]$ , a representação gráfica dos estados de segurança e falha pode ser genericamente representada através da Figura 4.1.

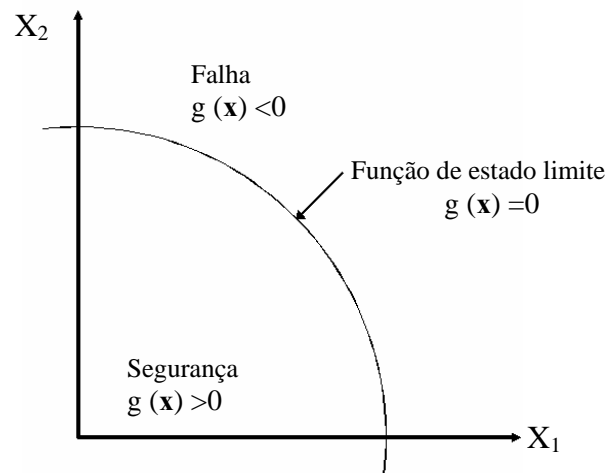
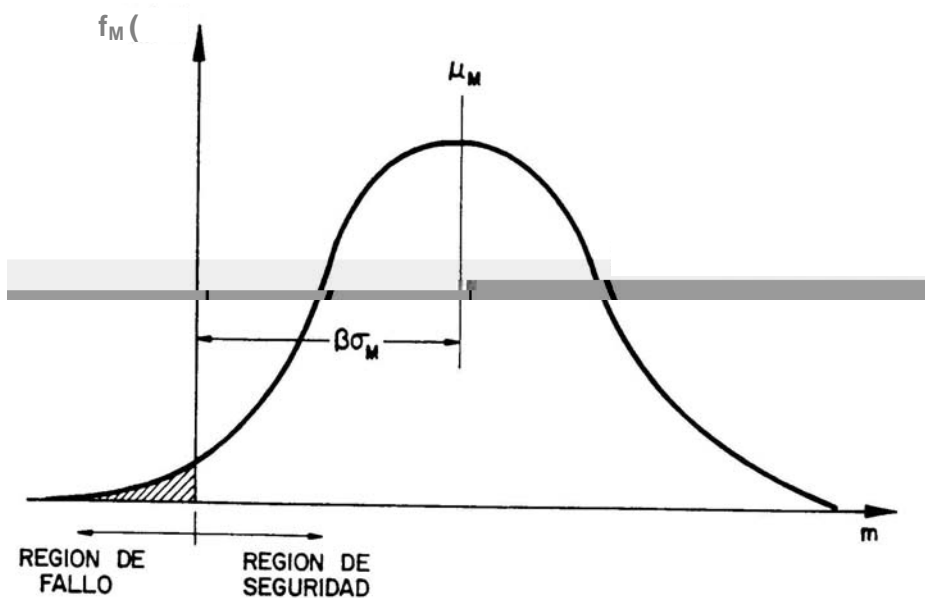


Figura 4.1-Representação gráfica da função de estado limite para um espaço bidimensional.

Na maioria das vezes a função de estado limite apresenta uma forma complexa. A mesma não pode ser representada por uma superfície de falha quando se tem mais de duas variáveis. Nesse caso, a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade podem ser representados graficamente pela área indicada na Figura 4.2.



4.2 - Representação do índice de confiabilidade de Cornell.  
 Fonte: Da Silva (1998).

De acordo com Gomes (2001) a avaliação direta da integral representada pela Equação 4.4 é frequentemente impossível de ser obtida, principalmente quando a função de estado limite  $[g(\mathbf{x})]$  apresenta um grande número de variáveis aleatórias. Desta forma, o valor da probabilidade de falha é geralmente determinado através de procedimentos numéricos ou por processos de simulação computacional (Melchers, 1987; Gomes, 2001).

#### 4.2.1 INCERTEZAS EXISTENTES NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Na Engenharia, no momento da realização de uma análise deve-se ter em mente a grande quantidade de incertezas inerentes ao processo. De acordo com Ang e Tang (1984), tais incertezas estão associadas à variabilidade inerente do próprio fenômeno físico que se está estudando ou com imperfeições relativas à modelagem desse processo físico.

Um fenômeno existente na natureza é essencialmente aleatório, o seu comportamento não pode ser descrito através de uma análise determinística, e deve-se incluir uma medida de variabilidade nas previsões de comportamento. Melchers (1987) admite a existência de algumas formas de incerteza na análise de confiabilidade, conforme apresentado na Figura 4.3.

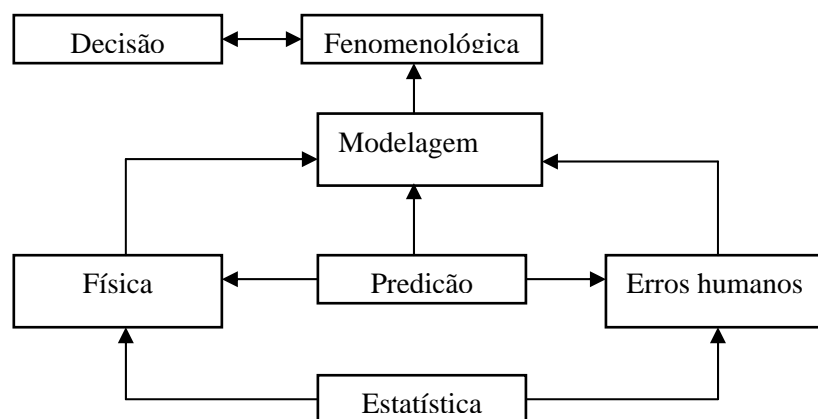


Figura 4.3 - Incertezas existentes na análise de confiabilidade (Melchers, 1987).



#### **4.2.1.1 Incertezas no Processo de Tomada de Decisão**

As incertezas existentes no processo de tomada de decisão estão relacionadas com a exata definição do estado limite para um determinado fenômeno. Um exemplo de uma incerteza desse tipo está relacionada à definição dos estados limites últimos e de serviço.

#### **4.2.1.2 Incertezas Fenomenológicas**

Uma incerteza do tipo fenomenológica é originada sempre que existam falhas em alguma das etapas do processo construtivo de uma estrutura (planejamento / projeto, materiais, execução e utilização) que gerem outros problemas sobre qualquer aspecto do comportamento da mesma durante a sua construção, utilização normal e /ou quando da ocorrência de condições extremas (carregamento ou ambientais).

#### **4.2.1.3 Incertezas na Modelagem**

Esta é introduzida nas análises quando se emprega uma relação simplificada entre as variáveis, para representar o comportamento real do fenômeno de interesse. As incertezas relacionadas à definição tanto dos modelos físicos de predição quanto das equações de estados limites admitidas estão incluídas neste grupo de indefinições.

#### **4.2.1.4 Incertezas na Predição do Instante de Falha**

Essa incerteza está diretamente relacionada com o nível de informação que é disponibilizada para a análise de um sistema estrutural.

#### **4.2.1.5 Incertezas Físicas**

As incertezas físicas estão diretamente associadas com a natureza aleatória das variáveis básicas. Tal problema pode ser minimizado caso haja uma grande quantidade de dados disponíveis para análise ou quando existe um rigoroso controle sobre todos os fatores intervenientes no processo de falha, porém usualmente estas incertezas não podem ser eliminadas. As incertezas físicas de uma variável geralmente não são conhecidas no momento da realização das predições, devendo ser estimadas através de observações experimentais ou por análises subjetivas do fenômeno estudado.

#### **4.2.1.6 Incertezas Estatísticas**

Estimadores estatísticos podem ser determinados a partir das informações sobre uma determinada variável básica (médias e desvios-padrão), a fim de serem usados como parâmetros de uma função densidade de probabilidade. Tais parâmetros não representam fielmente o comportamento da variável, pois observa-se que amostras distintas de dados geralmente produzem estimadores diferentes para uma mesma variável. Daí resulta que os estimadores mais empregados nas análises de probabilidade também são variáveis aleatórias, sendo mais uma fonte de incerteza incorporada às análises de confiabilidade.

#### **4.2.1.7 Incertezas Relacionadas à Falhas Humanas**

São incertezas resultantes do próprio envolvimento humano no desenvolvimento do projeto, construção, uso e análise de uma estrutura.

#### 4.2.2 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS E FUNÇÕES DE PROBABILIDADE

Segundo Ang e Tang (1984), devido à natureza eminentemente aleatória dos fenômenos existentes, deve-se estabelecer que as variáveis que representam um determinado fenômeno apresentam uma determinada função densidade de probabilidade, podendo ser definidas como variáveis aleatórias básicas. Uma variável aleatória pode ser ajustada a alguma função densidade de probabilidade.

As dimensões de um elemento estrutural, a densidade do material, valores de cargas e as resistências dos materiais são alguns exemplos típicos desse conjunto de variáveis. De acordo com Melchers (1987), algumas variáveis básicas são correlacionadas com algumas variáveis chamadas pelo autor de fundamentais.

Um exemplo claro é a resistência à compressão do concreto (variável básica), que é função de algumas variáveis fundamentais, como a relação a/c, o consumo de cimento e a granulometria dos agregados, entre outras.

De acordo com alguns autores (Ang e Tang, 1984; Melchers, 1987), existe uma relação entre o índice de confiabilidade ( ) e a probabilidade de falha ( $P_f$ ) de um elemento ou sistema, sendo a mesma expressa pela Equação 4.5 ou pela Equação 4.6 e Figura 4.4.

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad \text{Equação. 4.5}$$

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad \text{Equação. 4.6}$$

Onde:

- Função de distribuição acumulada normal padrão ( $\mu = 0$ ;  $\sigma = 1$ ).

Tabela 4.1 - Exemplos de distribuições estatísticas (Ang e Tang, 1984; Elsayed, 1996 apud Figueiredo, 2004).

Distribuição	Densidade de Probabilidade	Parâmetros	Intervalos
Normal ou Gaussiana	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\mu,$	$-\infty < x < +\infty$
Log-normal	$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right]}$	,	$\lambda = \ln xm$
Gamma	$f(x) = \frac{x^{\gamma-1}}{\theta^\gamma \Gamma(\gamma)} e^{-\frac{x}{\theta}}$	$\theta, \gamma$	$x \geq 0$
Gumbel	$f(x) = \exp\left[-e^{-\alpha(x-\mu)}\right]$	$\mu, \alpha$	$-\infty < x < +\infty$
Exponencial	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$\lambda$	$x \geq 0$
Weibull	$f(x) = \frac{\gamma}{\theta} x^{\gamma-1} e^{-\frac{x^\gamma}{\theta}}$	$\gamma, \theta$	$x \geq 0$

Fonte: Figueiredo (2004).

Várias publicações apresentam a relação existente entre o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha. Dentre elas pode-se citar Ang e Tang (1984) e Melchers (1987) conforme Tabela 4.2 e Figura 4.4

Tabela 4.2 - Índice de confiabilidade *versus* probabilidade de falha (Ang e Tang, 1984; Melchers, 1987).

	0,0	1,30	2,33	3,10	3,72	4,30	4,80	5,20
$P_f$	0,5	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$

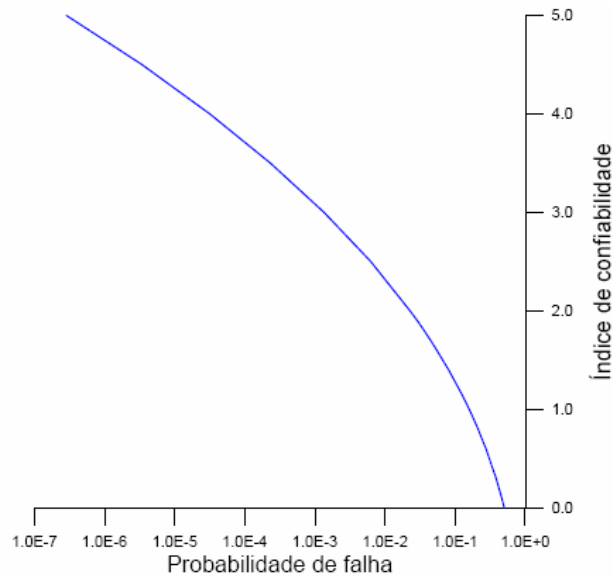


Figura 4.4 - Relação entre o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha.

À medida que o valor do índice de confiabilidade vai diminuindo, a probabilidade de falha vai aumentando, mostrando que a estrutura estaria chegando próximo ao estado limite estabelecido. Uma representação gráfica da relação existente entre o aumento da probabilidade de falha com a diminuição dos níveis de desempenho em uma estrutura pode ser observada na Figura 4.5.

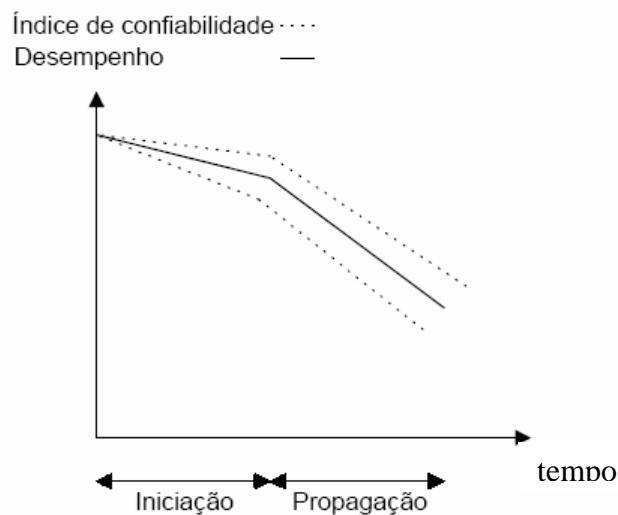


Figura 4.5 Representação esquemática da perda de funcionalidade *versus* índice de confiabilidade [adaptado de Tuutti (1982)].

No gráfico apresentado, a linha cheia corresponde à perda de desempenho apresentada originalmente no modelo proposto por Tuutti (1982). Já a área inserida entre as linhas tracejadas representa a provável diminuição do índice de confiabilidade do elemento ou da estrutura, decorrente da ação de algum processo de degradação. Desta forma, baseando-se nos conceitos expostos até o presente momento, existe a possibilidade de serem desenvolvidos estudos no sentido de estabelecer limites quantitativos – traduzidos pelos valores de ( ) associados os diversos níveis de perda de desempenho do material no decorrer do tempo.

Como visto na introdução deste capítulo, existem vários procedimentos para a obtenção da probabilidade de falha de um componente. Dentre estes, os métodos de aproximação numérica, como o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (First Order Reliability Method – FORM) e o Método de Confiabilidade de Segundo Momento de Primeira Ordem (First Order Second Moment - FOSM) e os processos de simulação (Método de Simulação de Monte Carlo), são os procedimentos mais utilizados para a obtenção dos índices de confiabilidade.

No campo das Engenharias, o conceito de simulação está relacionado ao estudo do desempenho / resposta de um determinado sistema. Adotando-se valores específicos para as variáveis que influenciam no projeto, pode-se obter uma determinada resposta para o sistema. Através da realização de simulações sucessivas pode-se avaliar o comportamento do sistema em função da variação dos parâmetros intervenientes. Ainda de acordo com Melchers (1987), este procedimento é bastante útil no sentido de otimizar um determinado projeto.

Segundo Figueiredo (2004), a escolha do procedimento que vai ser utilizado nas análises vai depender do nível de complexidade das funções de estado limite adotadas, da resposta desejada para o sistema e do tempo de processamento necessário para a obtenção do índice de confiabilidade. Verifica-se que tais pontos são bem conhecidos para o caso da análise da confiabilidade de sistemas estruturais (Ang e Tang, 1984).

Para o caso específico da aplicação desse conceito na previsão da vida útil das estruturas de concreto armado, na grande maioria das pesquisas efetuadas recentemente (Andrade,

2001), é empregado o método de simulação de Monte Carlo para se obter o índice de confiabilidade associado a uma determinada probabilidade de falha.

Entretanto, segundo Bentz (2003), os métodos FORM (First Order Reliability Method ) e SORM (Second Order Reliability Method ) são os mais apropriados para determinar probabilidade de falhas muito pequenas, como no caso de um colapso estrutural. O autor afirma que o método de Simulação de Monte Carlo permite avaliar diretamente a probabilidade de falha, mas é ineficaz quando a probabilidade de falha é muito pequena. Isto se deve ao grande número de simulações que devem ser realizadas para se obter um valor satisfatório.

#### **4.2.3 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO**

Segundo Melchers (1987), a simulação é um processo de reprodução do comportamento de um determinado fenômeno no mundo natural, baseando-se em assertivas determinadas a partir da observação.

Para problemas que envolvem variáveis aleatórias que apresentem uma distribuição de probabilidade conhecida (ou assumida), o método de simulação mais empregado é a Simulação de Monte Carlo.

O princípio básico do método é a repetição do processo de simulação, empregando-se em cada execução um determinado valor da variável aleatória, levando-se em consideração a distribuição de probabilidade da mesma. Os resultados de uma simulação podem ser tratados estatisticamente, onde os métodos relacionados podem ser aplicados.

Os processos de simulação representam uma excelente ferramenta para se modelar o comportamento de um determinado sistema. Tais métodos são empregados exaustivamente na análise de modelos hidrológicos e na Engenharia Estrutural. O método foi empregado por Krakovski (1995) para avaliar o controle de qualidade do concreto.

A aplicação desse método para a avaliação da vida útil das estruturas atacadas por diversos processos de degradação vem sendo estudada recentemente por outros pesquisadores, onde os resultados mostraram se bastante animadores com relação ao seu uso nesta área do conhecimento.

Conclui-se que no método Monte Carlo um jogo de possibilidade é construído para se conhecer as propriedades probabilísticas em ordem de resolução de muitos problemas ao mesmo tempo, e para dedução do resultado exigido (isto é, a probabilidade de falhas).

#### **4.2.3.1 Geração de Números Aleatórios**

O primeiro passo para a realização de uma simulação é a geração de números aleatórios, etapa que é considerada por Melchers (1987) como um ponto chave para o sucesso da simulação de Monte Carlo. Em um experimento pode ser possível selecionar uma amostra de cada variável básica através de algum processo de seleção aleatório, onde se admite que esses números possuem uma distribuição uniforme.

É possível gerar números aleatórios distribuídos uniformemente através de roletas automáticas ou alguns circuitos eletrônicos. Esses geradores tendem a ser lentos e não reproduzíveis. Tabelas de números aleatórios (Rand Corporation) podem ser reservadas em sistemas computacionais, mas a recuperação destas para uso é também muito lenta.

A geração de números aleatórios uniformemente distribuídos com valores compreendidos no intervalo  $[0,1]$  também pode ser feita através dos processadores existentes nos computadores pessoais (Melchers, 1987).



### 4.2.3.2 Geração das Variáveis Aleatórias

Variáveis básicas, apenas raramente, têm uma distribuição uniforme. Uma amostra de valores para uma variável básica com uma dada (não uniforme) distribuição é chamada variável aleatória e pode ser obtida por um razoável número de técnicas matemáticas.

A partir dos números aleatórios podem ser geradas as variáveis aleatórias, de acordo com o procedimento denominado de método da transformação inversa (Melchers, 1987).

Considere-se uma variável básica  $x$  que apresente uma dada função de distribuição acumulada  $F_x(x)$ , compreendida no intervalo  $[0, 1]$ . A partir daí é gerado um conjunto de números aleatórios uniformemente distribuídos  $r_i$  ( $0 \leq r_i \leq 1$ ). Para cada número aleatório gerado é feita uma correspondência com a função de distribuição acumulada da variável (admitindo-se que se conheça o tipo de distribuição da mesma - normal, log-normal, entre outras), de onde são extraídos os valores das variáveis ( $x_i$ ), conforme apresentado na Figura 4.6 (Melchers, 1987).

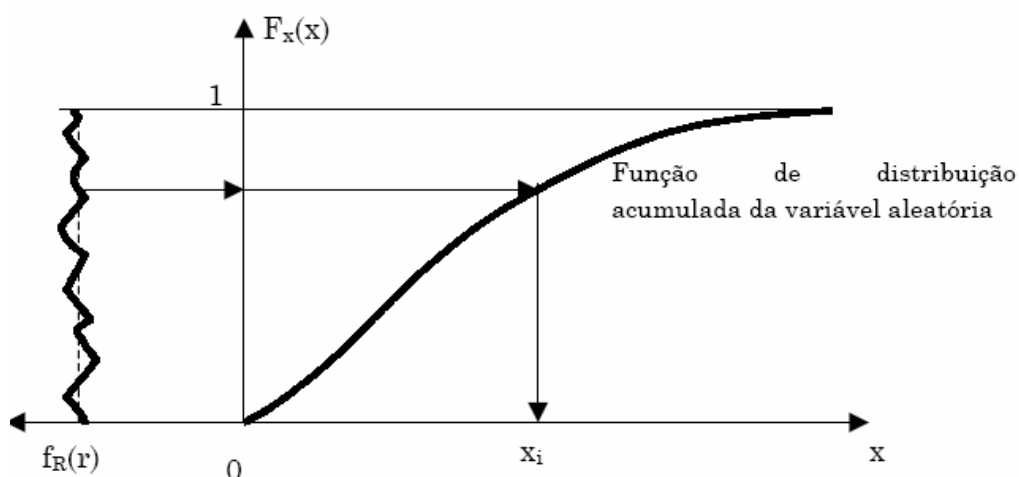


Figura 4.6-Método de transformação inversa para a geração das variáveis aleatórias (Melchers, 1987).

Os valores individuais da variável aleatória ( $x_i$ ) são obtidos através do cálculo do valor inverso da função de distribuição acumulada para cada ponto avaliado (Ang e Tang, 1984; Melchers, 1987), conforme mostrado na Equação 4.7 abaixo:

$$x_i = F_x^{-1}(r_i) \quad \text{Equação 4.7}$$

Segundo Melchers (1987) dependendo do número de números aleatórios gerados ( $r_i$ ), pode-se ter uma grande quantidade de valores simulados para a variável aleatória desejada ( $x_i$ ). Técnicas especializadas para geração de variáveis aleatórias de distribuição específica são frequentemente e computacionalmente mais eficientes que o método da transformação inversa.

#### **4.2.3.3 Determinação da Função Densidade de Probabilidade e da Probabilidade de Falha**

A simulação direta de Monte Carlo pode ser entendida como o cálculo da frequência relativa dos casos de falha observados nos diversos experimentos, para as diversas amostras das variáveis aleatórias envolvidas (Gomes, 1997). Para determinar a probabilidade de falha através da simulação de Monte Carlo basta verificar quantos pontos, em relação ao total de números simulados ( $n$ ), estão localizados dentro da região de falha ( $n_f$ ), sendo o limite de falha previamente estabelecido (Ang e Tang, 1984). Uma representação gráfica deste conceito é apresentada na Figura 4.7.

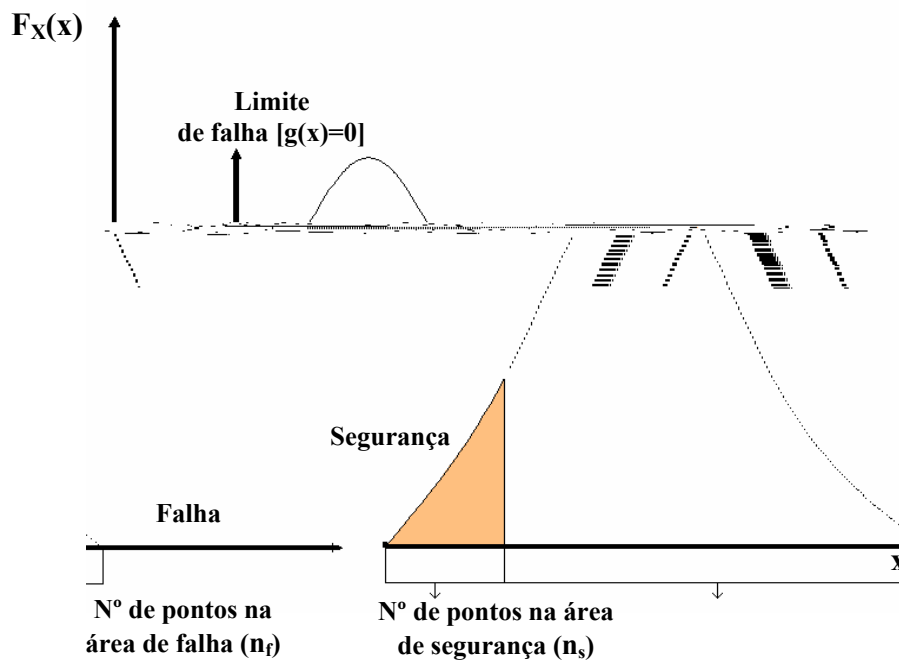


Figura 4.7 - Representação gráfica dos estados de falha e segurança (Ang e Tang, 1984).

Assim, a probabilidade de falha ( $P_f$ ) pode ser simplificada representada pela Equação 4.8.

$$P_f = \frac{n_f}{n} \tag{Equação 4.8}$$

Onde:

- $n_f$  - Total de realizações obtidas para a resposta do sistema.
- $n$  - Total de realizações correspondentes à falha do sistema.

A estimativa da probabilidade de falha para o caso simples de uma variável não apresenta grandes dificuldades, podendo ser calculada através do uso de planilhas eletrônicas disponíveis comercialmente. Contudo, para o caso de funções de estado limite compostas por uma grande quantidade de variáveis (que podem ter diferentes tipos de distribuição e valores das médias e dos desvios-padrão), o volume de trabalho necessário para o cálculo da probabilidade de falha aumenta bastante. Nestes casos, o pesquisador deve fazer uso das técnicas de programação para a obtenção dos resultados (Ang e Tang, 1984; Gomes, 2001).

### 4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS

Segundo Da Silva (1998), ao avaliar a previsão da vida útil em estruturas, um dos maiores problemas encontrados para o efetivo emprego dos métodos probabilísticos, encontra-se na caracterização estatística das variáveis básicas que influenciam nos processos de degradação, principalmente em função da dificuldade de se obter dados suficientes para caracterizar tais variáveis.

Uma alternativa possível é a recompilação de dados obtidos através da realização de inspeções em edifícios, da análise de casos encontrados na literatura especializada e através de pesquisa em material proveniente de órgãos ou institutos relacionados com a meteorologia e com o meio ambiente.

Contudo, observa-se que na bibliografia internacional encontra-se disponível alguns dados que permitem determinar as propriedades estatísticas de determinadas variáveis, sendo tal procedimento utilizado para a caracterização de variáveis por Da Silva (1998) e Andrade (2001).

Siemes et al (1985) utilizaram os dados apresentados na Tabela 4.3 para investigar o efeito da corrosão de armaduras induzida pela carbonatação em vigas de concreto armado. Com tais valores foram calculadas as probabilidades de falha associadas às diversas alternativas de projeto (como alterações na espessura de cobrimento), a fim de maximizar a vida útil dos elementos investigados.

Atualmente existem poucos dados estatísticos publicados na literatura especializada a respeito da relação  $a/c$  dos concretos. Da Silva (1998) realizou um estudo analítico para se determinar o valor do coeficiente de variação da relação  $a/c$  para concretos que apresentam diferentes níveis de resistência, onde os resultados encontrados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 - Propriedades estatísticas das variáveis proposta por Siemes et al (1985).

Variável	Unidade	Média ( $\mu$ )	COV	Distribuição
Espessura de cobrimento (e=1,5 cm)	cm	2,0	0,25	log-normal
Espessura de cobrimento (e=2,0 cm)	cm	3,5	0,14	log-normal
Relação a/c	-	0,5	0,05	log-normal
Taxa de corrosão	cm/ano	0,04	0,50	log-normal
Diferença entre a profundidade de carbonatação máxima e a média	cm	0,5	0,20	log-normal

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

Tabela 4.4 - Variabilidade da relação a/c para vários tipos de concreto (Da Silva, 1998).

Resistência à Compressão		Relação a/c		
Média (MPa)	COV	Média	COV	Distribuição
20	0,10	0,836	0,05	log-normal
30	0,10	0,666	0,07	log-normal
40	0,10	0,548	0,07	log-normal
20	0,20	0,841	0,11	log-normal
30	0,20	0,666	0,13	log-normal
40	0,20	0,550	0,14	log-normal

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

Pode-se notar que o coeficiente de variação (COV) da relação a/c, acumula para menor relação a/c e corresponde a aproximadamente 0,7 do coeficiente de variação da resistência à compressão para concretos de 30 e 40 MPa. Com base nesses valores, Da Silva (1998) adotou tal relação para estabelecer a variabilidade da relação a/c na sua pesquisa.

De acordo com Helene (1993), a variabilidade da relação a/c depende da precisão das balanças no momento da pesagem do material, do adequado controle da umidade da areia e da precisão do enchimento e do rasamento das caixas de medição, no caso de dosagem em volume, estabelecendo um coeficiente de variação adequado para tal propriedade entre 0,05 e 0,1.

Gomes (1997) realizou uma análise de confiabilidade em uma viga de concreto armado, onde os efeitos de carregamento e da degradação da mesma pela corrosão de armaduras induzida pela carbonatação, foram adotados no estabelecimento da função de estado limite para o elemento avaliado. A caracterização de algumas das variáveis que são consideradas na formulação proposta pelos autores está apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Propriedades estatísticas das variáveis proposta por Gom

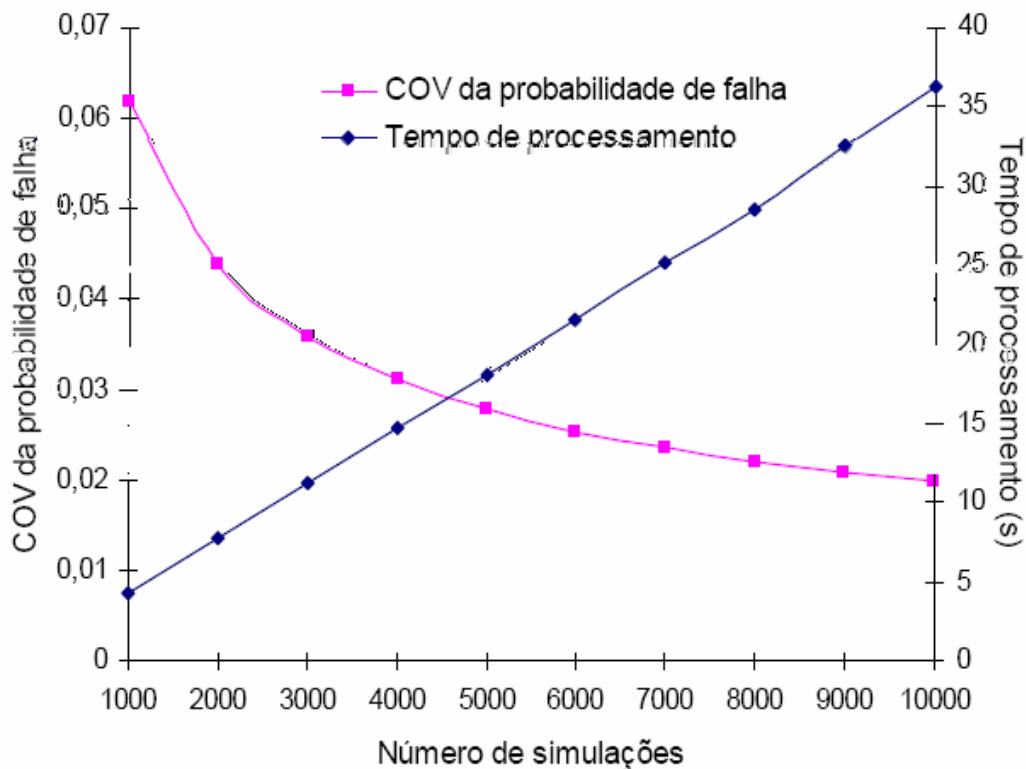


Figura 4.8 - Relação entre o número de simulações, o tempo de processamento e a variabilidade da probabilidade de falha (Andrade, 2001).

Andrade (2001) empregou modelos existentes para determinar o número de simulações a serem adotadas para a realização das análises de confiabilidade. Avaliou-se a influência do número de simulações no COV da probabilidade de falha para cada modelo, tendo observado que o COV da probabilidade de falha apresenta uma diminuição notável até 5000 simulações, onde os valores do COV ficaram em torno de 0,03. A partir desse ponto, observa-se um decréscimo mais gradativo, à medida que se aumenta o número de simulações.

De acordo com Gomes (2001), valores da ordem de 0,05 para o COV da probabilidade de falha são bons indicativos da precisão da resposta do sistema. Já o tempo de processamento necessário para se obter o valor da  $P_f$  depende basicamente da complexidade da função de estado limite, da plataforma computacional utilizada para o processamento e do número de simulações realizadas.

#### 4.4.2 OBJETIVO DA PROBABILIDADE DE FALHA

Através da probabilidade de falha é possível avaliar as condições de desempenho das estruturas, definir valores de projeto e avaliar a necessidade de manutenção das estruturas existentes. Existem, em princípio, duas possibilidades para o funcionamento da estrutura: a primeira, que a estrutura irá falhar de acordo com a probabilidade de falha ( $P_f$ ), e a segunda, que a estrutura estará trabalhando normalmente segundo a função  $(1 - P_f)$ .

A definição do valor do índice de confiabilidade ou da probabilidade de falha depende de uma série de fatores, onde o mais importante é o que diz respeito aos níveis de desempenho definidos para a estrutura, e os mesmos devem ser previamente especificados pelo projetista a fim de separar claramente, limites entre os estados últimos e de serviço que são estabelecidos. Desta forma, o conceito dos dois principais estados limites está explicitado a seguir (Siemes et al, 1985):

- Estados limites últimos referem-se a eventos que apresentam danos irreversíveis, geralmente associados com elevados prejuízos financeiros e/ou perdas humanas; e
- Estados limites de serviço estão relacionados a eventos que restringem de alguma forma a adequada utilização da estrutura. Nesse caso, em geral, os prejuízos de ordem econômica são restritos e as perdas humanas não são esperadas. Podem reduzir a durabilidade ou comprometer a aparência ou eficiência da estrutura. Alguns institutos ou organismos normatizadores no mundo apresentaram os índices de confiabilidade dentro desses conceitos, conforme apresentados na Tabela 4.6 (Siemes et al, 1985).

Pode-se observar que existe uma definição bem clara dos estados limites últimos, pois estão diretamente relacionados com a probabilidade de ruína de um sistema estrutural. Já para o caso dos estados limites de serviço, observa-se a inexistência de pesquisas sistemáticas que definam claramente os índices de confiabilidade desejados para tal nível de desempenho, principalmente em função da grande quantidade de formas de degradação existentes e da dificuldade em se definir claramente tal estado limite para cada estrutura em particular.



Tabela 4.6 - Probabilidades de falha associadas as diferentes exigências de desempenho (Siemes et al, 1985).

Tipo de Desempenho requerido	Índice de confiabilidade para um período de 50 anos						$P_f$ aproximada
	EUROCODE	Holanda	Suíça	Alemanha	Escandinávia	EUA	
Estado limite último	3,8	3,6	4	4,7	4,2	3	$10^{-4}$
Estado limite de serviço	1,5	-	-	-	-	-	$10^{-2}$

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

De acordo com Figueiredo (2004) vários autores definem os valores do índice de confiabilidade entre 3,1 e 4,7 ( $P_f$  entre  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$ ), para o estado limite último, segundo as conseqüências da falha da estrutura. Para o estado limite de serviço o índice de confiabilidade varia entre 1,3 a 2,3 ( $P_f$  entre  $10^{-1}$  a  $10^{-2}$ ), de acordo com o custo de reabilitação da estrutura, sendo aceitável uma variação no índice de confiabilidade da ordem de 0,3.

A aceitação de valores de  $P_f$  variando entre 0,1 a  $10^{-6}$  depende do tipo de desempenho e do risco envolvido. Segundo o CEB (1997), valores pequenos para a probabilidade de falha devem ser considerados quando existem vidas envolvidas ou quando as perdas econômicas forem muito altas e probabilidades de falha maiores podem ser consideradas quando os danos forem menores. Estudo realizado pelo CEB (1997) para avaliar a carbonatação do concreto em uma marquise adotou como probabilidade de falha o valor de 0,1.

## CAPÍTULO 5

# MODELOS MATEMÁTICOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

### 5.1 INTRODUÇÃO

Os modelos podem ser considerados como expressões matemáticas compostas por parâmetros mais representativos do fenômeno que representam o mecanismo de deterioração. Existem vários modelos matemáticos que estimam a vida útil das estruturas de concreto, porém como já visto nos capítulos anteriores este trabalho tem um estudo mais voltado para edificações residenciais inseridas no meio urbano e em ambientes internos não marinhos e não industriais, portanto, serão considerados os modelos mais adequados para este tipo de ambiente.

A literatura refere-se basicamente a dois grupos de modelos desenvolvidos para representar a degradação das estruturas. Os modelos relativos à corrosão das armaduras e outro a deterioração do concreto.

Os modelos de deterioração são considerados também em dois grupos, em função da sua aplicação de forma probabilística. O primeiro grupo contempla aos modelos que estimam a profundidade média da frente de carbonatação ou de teor limite de cloretos e, o segundo,

aos modelos que estimam um valor máximo da profundidade da frente de carbonatação, considerando uma pequena probabilidade de ser alcançado (Da Silva, 1998).

Os modelos do primeiro grupo, desenvolvidos a partir do estudo da influência das principais variáveis que afetam o processo, apresentam grande interesse para aplicação de métodos probabilísticos, pois permitem considerar alterações de valores nessas variáveis.

No entanto, os modelos do segundo grupo, por considerarem valores extremos, devem ser empregados em casos considerados de grande agressividade, pois assim os valores estimados estarão próximos dos medidos. Um outro ponto desfavorável desses modelos é que, geralmente, baseiam-se exclusivamente na resistência à compressão do concreto ou na relação água/cimento.

De forma geral, os modelos visam reproduzir os mecanismos de degradação do material, da estrutura ou do sistema como um todo.

## **5.2 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO**

As interações ambientais com a microestrutura do concreto provocam mudanças em suas propriedades, tornando o concreto susceptível a diversas manifestações patológicas. As manifestações patológicas em estruturas de concreto podem ser fissuras, desagregação, flechas excessivas, infiltrações, corrosão de armaduras, recalque, armadura exposta, manchas superficiais, dentre outras.

Os mecanismos de degradação das estruturas são divididos em dois grupos: os que causam a deterioração do concreto, como as reações álcali-agregados ou o ataque por sulfatos; e os que afetam as armaduras, como a corrosão.

A corrosão das armaduras caracteriza-se por ser um processo físico-químico gerador de óxidos e hidróxidos de ferro, denominados de produtos de corrosão, que ocupam um volume significativamente superior ao volume original das barras metálicas.

De acordo com Gentil (1996), o mecanismo de corrosão nos metais pode ocorrer basicamente de duas formas. A primeira está relacionada com a corrosão de caráter puramente químico, chamada de oxidação. Tal reação ocorre por uma reação gás/sólido na superfície do material, e é caracterizada pela formação de um filme delgado de produtos de corrosão na superfície do metal.

A segunda forma de corrosão é chamada de corrosão eletroquímica, que é o tipo de deterioração observada nas estruturas de concreto armado. Esse fenômeno de natureza expansiva pode levar ao aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando a fissuração e o posterior lascamento do cobrimento do material. Todos esses fatores causam uma perda de seção transversal e de aderência entre a armadura e o concreto, inabilitando a transferência de tensões entre os materiais, podendo levar o elemento estrutural ao colapso (Tuutti, 1982; Helene, 1993; Mehta, 1994).

Segundo Helene (1993), a armadura dentro do concreto normalmente encontra-se protegida da corrosão devido à alta alcalinidade deste material (pH entre 12,7 e 13,8). Esse nível de pH favorece a formação de uma camada de óxidos submicroscópica passivante, compacta e aderente sobre a superfície da armadura. Essa camada protege a mesma de qualquer sinal de corrosão, desde que as condições de potencial e pH mantenham-se estáveis. No entanto, esta passividade pode ser destruída pela penetração de agentes agressivos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ , entre outros) que podem alterar as condições acima referidas, com a alteração do pH junto à armadura de forma generalizada ou pontual (Helene, 1993).

A corrosão das armaduras pode ser representada através do modelo proposto por Tuutti (1982). Este pode ser dividido em duas fases bem distintas (Figura 5.1). Na primeira, denominada período de iniciação, ocorre a penetração dos agentes agressivos até que estes atinjam a armadura, despassivando-as, sem a perda de funcionalidade da estrutura. Na segunda, denominada período de propagação, há uma aceleração do processo de degradação da estrutura, comprometendo tanto a estabilidade estrutural quanto o seu aspecto visual.

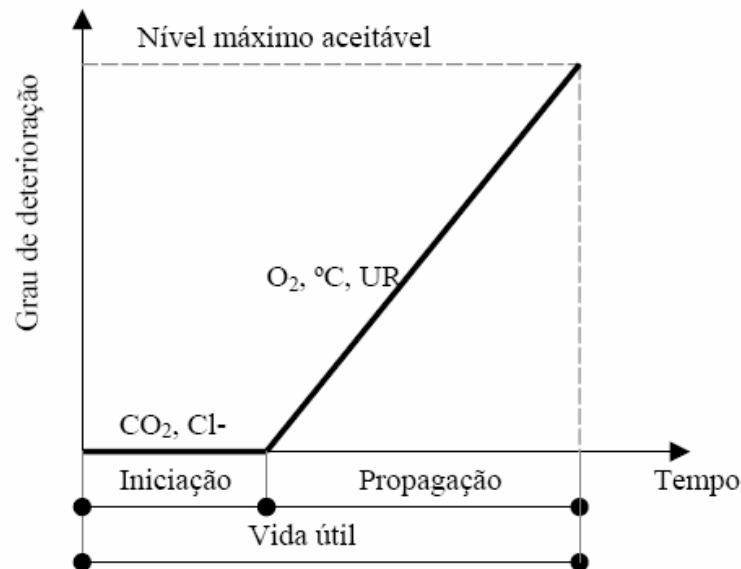


Figura 5.1 - Modelo de vida útil de Tuutti (1982).

O processo da corrosão inicia-se na fase de propagação e os fatores que influenciam na taxa de corrosão definem a duração desse estágio (Tuutti, 1982). Após a despassivação, o processo corrosivo começa efetivamente a instalar-se, com o início da fase de propagação, onde ocorre a dissolução do ferro (oxidação), gerando os chamados produtos de corrosão.

O mecanismo de corrosão eletroquímica é um processo de dissolução anódica entre metais diferentes ou entre distintas partes do mesmo metal, configurando o que se chama de pilha de corrosão ou célula de corrosão. Para que haja a formação da pilha de corrosão é necessária a existência de meios de transporte para que os íons e os elétrons originários desse processo se movimentem entre as áreas anódicas e as áreas catódicas. A resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio controlam a taxa de corrosão (Tuutti, 1982).

Segundo Da Silva (1998) para a análise da influência da concentração de  $\text{CO}_2$  na corrosão das armaduras, o ma

Os principais agentes responsáveis pelo início do processo corrosivo são o gás carbônico ( $\text{CO}_2$  presente na atmosfera, que origina o fenômeno conhecido como carbonatação) e os íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ).

O  $\text{CO}_2$  presente no ambiente, emitido pelas fábricas, usinas, veículos automotores, etc, penetra no concreto por difusão e reduz a alcalinidade do concreto. O fenômeno, denominado carbonatação, quando isolado, é até favorável ao concreto, por reduzir sua porosidade (Parrott, 1987). Contudo, ao atingir a armadura, reduz as condições de estabilidade química da película passivadora que envolve a armadura e, havendo presença de oxigênio e umidade, pode desencadear a corrosão (Figura 5.2).

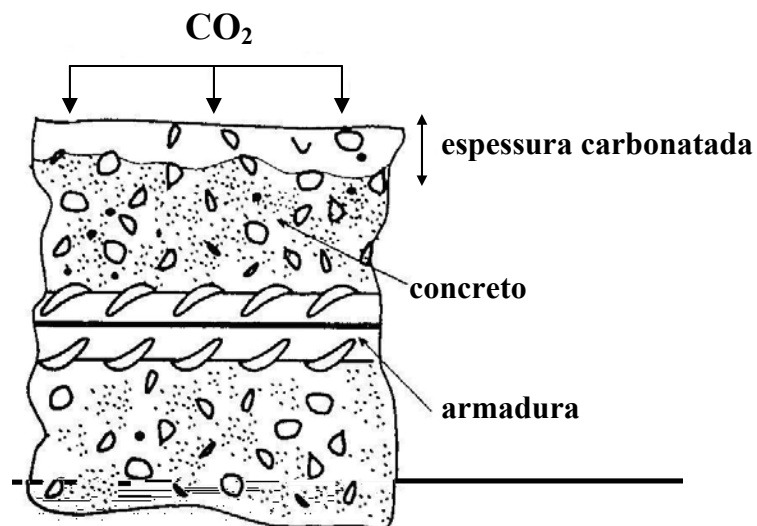


Figura 5.2-Carbonatação do concreto (CSIC, 1989 apud Da Silva, 1998).

Esses mecanismos podem atuar simultaneamente, ou sucessivamente, ao longo do tempo, dependendo das condições de exposição (temperatura, umidade) a que o concreto esteja submetido. Os mecanismos atuantes dependem da composição do concreto, do tipo de material, da idade, da cura e do conteúdo de umidade do concreto.

Segundo Tuutti (1982), a penetração de  $\text{CO}_2$  no concreto ocorre através dos poros capilares e das fissuras em um processo de difusão. O transporte de  $\text{CO}_2$  se efetua parcialmente através da fase gasosa e de uma pequena concentração na fase líquida. Isto pode ser justificado pela heterogeneidade dos poros do concreto.

Os poros capilares maiores, os quais não se enchem de água, funcionam como grandes canais de transporte de  $\text{CO}_2$ . Estes canais maiores se comunicam com pequenos canais que estão cheios de solução e retardam o processo de difusão, visto que o  $\text{CO}_2$  tem o coeficiente de difusão em água muito menor que ao ar.

A Figura 5.3 representa esquematicamente o percurso de difusão do  $\text{CO}_2$  no interior do concreto.

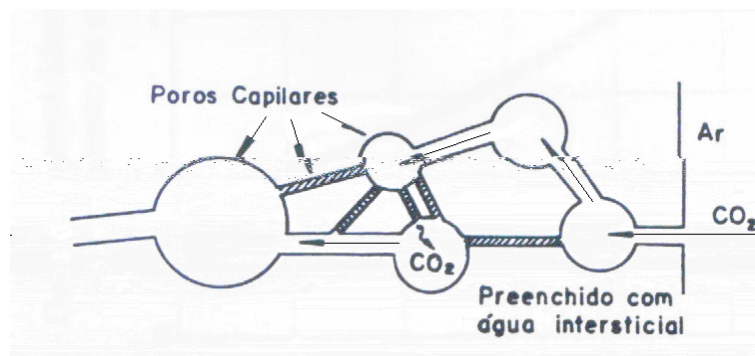


Figura 5.3-Representação esquemática do percurso de difusão do  $\text{CO}_2$  no concreto (Tuutti,1982).

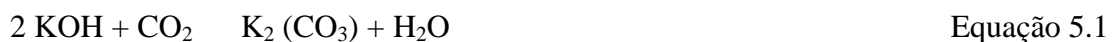
A difusão é a transferência de massa por movimento aleatório de moléculas ou íons da solução dos poros das regiões de altas concentrações para regiões de baixas concentrações da substância que a propaga (Kropp et al, 1995).

### 5.2.1 AÇÃO DO $\text{CO}_2$ NO CONCRETO

O  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera reage com alguns componentes do concreto provocando mudanças nas propriedades químicas e físicas do sistema. A ação principal do  $\text{CO}_2$  se dá pela penetração do mesmo no concreto devido à porosidade do material, ocasionando sua reação com os componentes alcalinos do cimento, denominada carbonatação.

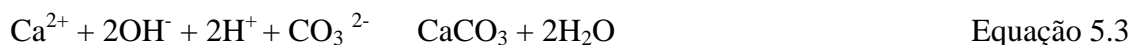
A principal reação de carbonatação é resultante da reação entre o  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera, que, por difusão, penetra na rede de poros do material e reage com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  do cimento hidratado, transformando-o em carbonatos.

As reações ocasionadas no interior do concreto devido à penetração do  $\text{CO}_2$  ocorrem em estágios. Inicialmente o  $\text{CO}_2$  reage com os hidróxidos de sódio e de potássio, aumentando a solubilidade para o hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , conforme apresentado nas Equações 5.1 e 5.2. Tal fato é explicado pelo hidróxido de cálcio ser menos solúvel que os outros álcalis do cimento, o hidróxido de sódio e o hidróxido de potássio. Dessa forma, o hidróxido de cálcio encontra-se na solução presente nos poros do concreto, normalmente na forma de cristais, enquanto os outros estão dissolvidos na forma de íons.



Posteriormente o  $\text{CO}_2$  reage com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   $\text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$  e a reação principal desse processo pode ser representada simplificada pela Equação 5.3.

Para que a reação de carbonatação se produza naturalmente, é necessário que o anidrido carbônico seja solubilizado ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$ ).



Como resultado destas reações originam-se os carbonatos, produzindo a neutralização da água dos poros. Esse processo recebe o nome de carbonatação, sendo o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) o produto preponderante no final do processo, assim como o produto característico do fenômeno (Tuutti, 1982).

O carbonato de cálcio formado possui uma baixa solubilidade e precipita dentro dos poros do concreto, reduzindo a porosidade e formando uma barreira para o progresso da frente de carbonatação.

Pode-se, de maneira simplificada, dizer que o  $\text{CO}_2$  reage com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em meio aquoso, resultando em carbonatos que neutralizam os poros e reduz o pH do concreto. Ao final do



processo de carbonatação, em condições normais de pressão de  $\text{CO}_2$ , o pH é de aproximadamente 8,3 (Schiessl, 1983). Segundo Tuutti (1982), formam-se duas zonas com pH muito diferentes: uma com pH menor que 9,0 (carbonatada) e outra com pH maior que 12,5 (não carbonatada), que pode ser ilustrada pela Figura 5.4.

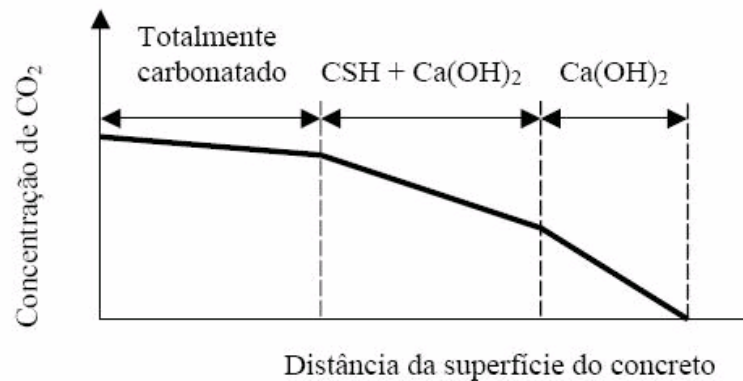


Figura 5.4 - Modelo simplificado para a carbonatação do concreto (Schiessl, 1983).

A carbonatação, apesar de ser responsável por um incremento pequeno de retração, não prejudica, por si só, o concreto. Até pelo contrário, concretos carbonatados são mais resistentes e menos permeáveis à penetração de agentes agressivos que os mesmos concretos não carbonatados (Helene, 1993; Parrott, 1987).

O problema ocorre com a redução da alcalinidade da solução presente nos poros ao redor das armaduras. O pH de precipitação do carbonato de cálcio [ $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ], que é de 8,3 a 9 à temperatura ambiente, reduz substancialmente as condições de estabilidade química da capa ou película passivadora do aço (Andrade, 1992).

Por referirem-se a um processo de difusão de um gás nos poros do concreto, todos os fatores que influenciam no tipo, na distribuição do tamanho dos poros, bem como a umidade na superfície influenciará na velocidade de carbonatação (Nepomuceno, 1992). Em poros saturados de água a difusão de  $\text{CO}_2$  será totalmente desprezível e, em poros excessivamente secos faltará água para que a reação ocorra (Helene, 1993).

### 5.3 ANÁLISE DOS COEFICIENTES DAS VARIÁVEIS DOS MODELOS

Os modelos de deterioração contêm parâmetros distintos e para estudo e uma posterior análise comparativa, é necessário definir os intervalos de valores e o valor básico das variáveis comuns, ou seja, para quais intervalos de valores os modelos foram desenvolvidos e qual serão os valores que permanecerão fixos quando se analisa uma variável do modelo. Segundo Da Silva (1998) para esta definição, tem-se uma análise dos valores empregados no desenvolvimento do modelo. Porém, é preciso levar em consideração que os modelos serão empregados para descrever as condições existentes no interior dos edifícios, e estas condições em alguns casos serão menos agressivas que as consideradas no desenvolvimento dos modelos.

Na Tabela 5.1 obtém-se um resumo dos valores máximos adotados para as variáveis comuns na maioria dos modelos.

Tabela 5.1 - Intervalo das variáveis comuns nos modelos de previsão

VARIÁVEL	UNIDADE	INTERVALO	VARIÁVEL	UNIDADE	COEFICIENTE
$C_{CO_2}$	%	0,03-0,12	UR	%	50 - 99
$D_{CO_2}$	$m^2/s$	$(0,5-6,0) \times 10^{-8}$	Temp.	$^{\circ}C$	5 - 35
$f_c$	MPa	10 - 45	W	Kg / Kg	0,4 - 0,9
$D_{Cl^-}$	$m^2/s$	$(2 - 12) \times 10^{-12}$	$C_{Cl^-}$	%	0,2 - 2,0

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

Onde:

- $C_{CO_2}$  - Concentração de  $CO_2$  na atmosfera.
- $D_{CO_2}$  - Coeficiente de difusão do  $CO_2$  no concreto.
- $f_c$  - Resistência a compressão do concreto.
- $D_{Cl^-}$  - Coeficiente de difusão dos cloretos no concreto.
- $C_{Cl^-}$  - Concentração de cloretos na superfície do concreto.
- UR - Umidade Relativa.
- Temp. - Temperatura.
- W - Relação a/c.

### 5.3.1 MODELO DE K. TUUTTI

O modelo proposto por Tuutti (1982) para o período de iniciação, como visto anteriormente no capítulo 4 item 4.2.2, tem a seguinte equação:

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 5.4}$$

Onde:

- x - é a profundidade carbonatada (mm).
- t - é o tempo de exposição (s).
- k - é uma constante de carbonatação ( $\text{mm/s}^{0,5}$ ), que depende das características do concreto, da concentração de  $\text{CO}_2$ , da umidade relativa e da temperatura.

Segundo Tuutti (1982), para determinação do coeficiente k da equação 5.1 considera-se que o processo pode ser descrito matematicamente através das equações de difusão de F. Crank, com as simplificações para o caso da difusão do  $\text{CO}_2$  no concreto, porém o processo matemático não será objeto de estudo deste trabalho.

A partir do trabalho de Tuutti (1982), a maioria dos modelos que estimam a profundidade de carbonatação utiliza k como coeficiente de carbonatação, apesar da expressão para sua determinação ser diferente nos modelos. Em função da composição dos valores extremos dos intervalos adotados para as variáveis, pode-se determinar os menores e os maiores coeficientes de carbonatação ( $k_{\text{inf}}$  e  $k_{\text{sup}}$ ) para cada modelo.

De acordo com Da Silva (1998) o resultado das análises apresentados na Tabela 5.2 e na Figura 5.5, foi considerado intervalos e valores básicos para as variáveis que são apresentadas no modelo, com relação água / cimento de 65%, temperatura de 19 °C e a quantidade ideal de cimento.

Tabela 5.2 - Variáveis e valores determinados através do modelo de Tuutti (1982)

VARIÁVEL	UNIDADE	INTERVALO	VALOR BÁSICO	k inf	k sup
$C_s$	Mol / kg	$(1,25-5,0) \times 10^{-2}$	$2,085 \times 10^{-2}$	2,54	5,08
$C_c$	Mol / kg	1851-3793	2440	3,77	2,63
D	$m^2/s$	$(0,5-6,0) \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	1,64	5,69

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

A equação para estimar a frente de carbonatação é:

$$C_s / C_c = \pi^{1/2} \cdot k / (2D^{1/2}) \cdot \exp(k^2 / 4D) \cdot \operatorname{erf}(k / 2D^{1/2}) \quad \text{Equação 5.5}$$

Onde:

- $C_s$  - Concentração de  $CO_2$  na superfície, ou seja, na atmosfera.
- $C_c$  - Quantidade de  $CO_2$  para a carbonatação completa do concreto.
- D - Coeficiente de difusão do  $CO_2$  no concreto.

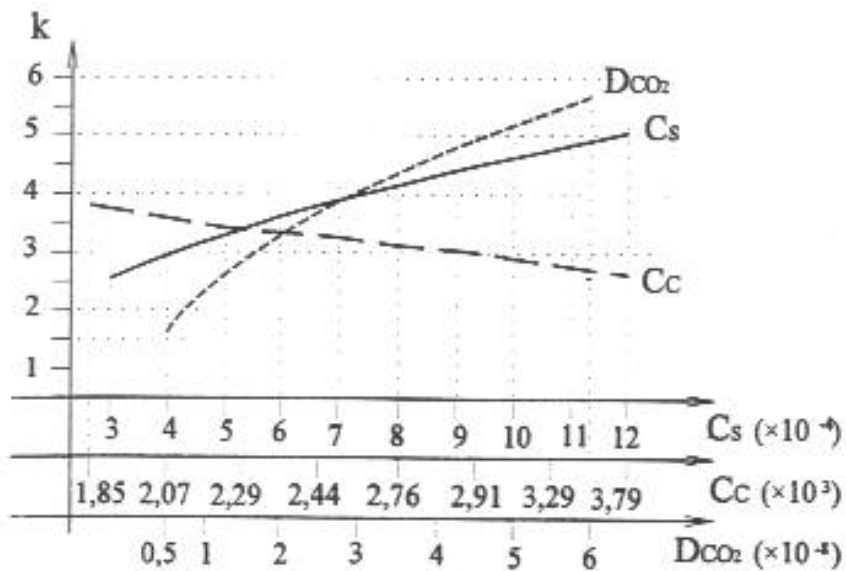


Figura 5.5 - Influência das variáveis no modelo de Tuutti (1982).

Fonte: Da Silva (1998).

### 5.3.2 MODELO DE C. BOB

Bob e Bob (1991) propuseram um modelo baseado em estudo de casos reais, em outros modelos disponíveis, previamente publicados e em experiências próprias. O modelo representado mediante a Equação 5.6, depende da resistência à compressão do concreto e de parâmetros que mantém uma correspondência com os principais fatores que influenciam na carbonatação.

$$x_c = 105 (c \cdot k \cdot d / f_c) \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 5.6}$$

Onde:

- $x_c$  - Profundidade de carbonatação (mm).
- $f_c$  - Resistência à compressão (N/mm<sup>2</sup>).
- $k$  - 1,0 interno (UR 60); 0,7 externo protegido (70 UR 75); 0,5 externo moderado (80 UR 85); 0,3 externo não protegido (UR > 90).
- $d$  - 1,0 e 2,0 para concentrações de CO<sub>2</sub> de 0,03% e 0,1%.
- $c$  - 1,0 Cimento Portland classe P40 e P45 e 0,8 para P50 e P55; 1,2 Cimento Portland 15% de adições; 1,4 e 2,0 para Cimento Portland máximo de 30% e 50% de adições.

Segundo Da Silva (1998), os resultados obtidos através do modelo de Bob e Bob (1991) representados na Tabela 5.3 e Figura 5.6, demonstram que a influência dos parâmetros são de mesma ordem entre 2,0 e 4,5. Entre estes parâmetros,  $f_c$  é o que mais influencia, produzindo uma relação de 4,5 entre os valores de  $k$ , obtidos para o maior valor e o menor do intervalo estudado.

Tabela 5.3 - Variáveis e valores determinados através do modelo de Bob e Bob, 1991 apud Da Silva, 1998.

VARIÁVEL	UNIDADE	INTERVALO	VALOR BÁSICO	k inf	k sup
c	-	0,8-2,0	1,0	6,1	15,4
k	-	0,3-1,0	1,0	2,3	7,7
d	-	1,0-2,0	1,28	6,0	12,0
$f_c$	N/mm <sup>2</sup>	45-10	25	4,3	19,2

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

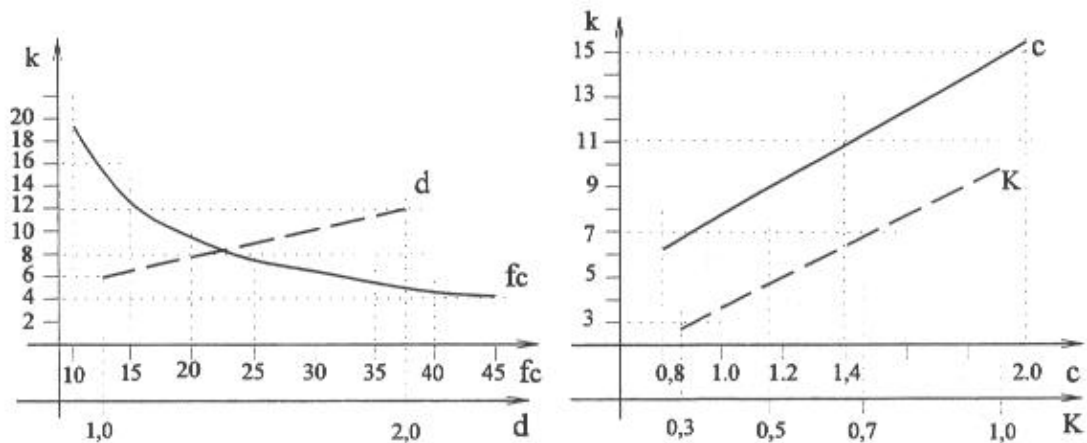


Figura 5.6 - Influência das variáveis no modelo de Bob e Bob (1991).  
 Fonte: Da Silva (1998).

**5.3.3 MODELO DE S. MORINAGA**

O modelo desenvolvido por Morinaga (1990) baseia-se em uma série de experimentos orientados através da velocidade da carbonatação e a influência do revestimento nela, para tal propôs as seguintes equações:

Para  $W \leq 60\%$

$$x_c = (C/5)^{1/2} \cdot 2,44 R \cdot (1,391 - 0,174 UR + 0,0217 T) \cdot (4,6 W - 1,76) \cdot \sqrt{t} \tag{Equação 5.7}$$

Para  $W \geq 60\%$

$$x_c = (C/5)^{1/2} \cdot 2,44 R \cdot (1,391 - 0,174 UR + 0,0217 T) \cdot [4,9 \cdot (W - 0,25) / (1,15 + 3 W)]^{1/2} \cdot \sqrt{t} \quad (W > 0,6) \tag{Equação 5.8}$$

Onde:

- W - é a relação água/cimento (kg/kg).
- C - é a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (%).
- UR - é a umidade relativa (%).
- T - é a temperatura (°C).
- R - revestimento (R= 1 sem revestimento).

Os resultados obtidos através do modelo de Morinaga (1990) estão representados na Tabela 5.4 e Figura 5.7.

Tabela 5.4 - Variáveis e valores determinados através do modelo de Morinaga, 1990 apud Da Silva, 1998.

VARIÁVEL	UNIDADE	INTERVALO	VALOR BÁSICO	k inf	k sup
W	kg / kg	0,4-0,9	0,65	0,23	4,60
C	%	0,03-0,12	0,05	2,44	4,89
UR	%	50-99	60	3,03	3,19
T	°C	5-35	19	2,59	3,80

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

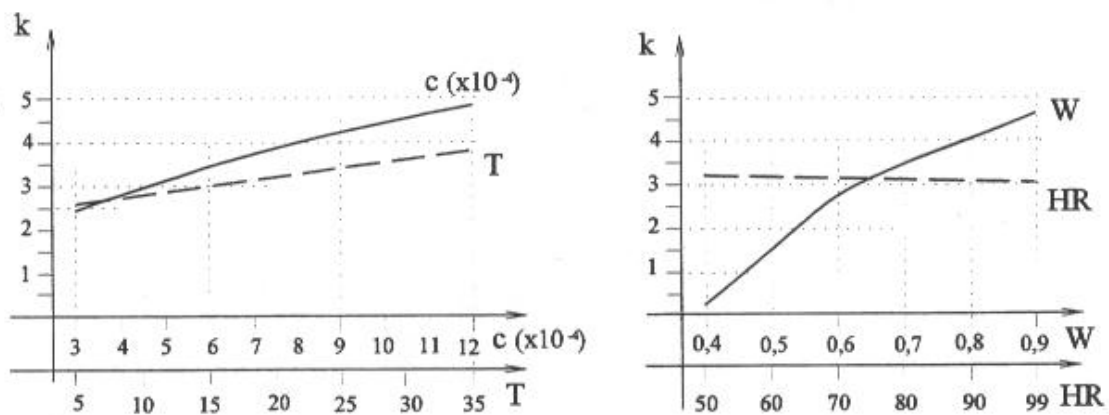


Figura 5.7 - Influência das variáveis no modelo de Morinaga (1990).

Fonte: Da Silva (1998).

### 5.3.4 MODELO DE P. SCHIESSL

Segundo Schiessl (1983) apud Da Silva (1998), as estruturas expostas em condições exteriores, ou seja, com altas umidades relativas, a velocidade com que avança a frente de carbonatação não é proporcional a raiz quadrada do tempo. Os mais importantes fenômenos que influem neste processo são: o endurecimento do concreto, a difusão das hidroxilas no interior do concreto e a umidade nas regiões próximas a superfície.

De acordo com o modelo desenvolvido por Schiessl (1983), a profundidade de carbonatação se expressa como mostrado na Equação 5.9.

$$x = (2 D_B \cdot (c_1 - c_2) / a)^{1/2} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Equação 5.9}$$

Onde:

- t - Tempo (s).
- a - Quantidade máxima de CO<sub>2</sub>.
- b - Fator ambiental de retardamento (kg. m<sup>-2</sup>. s<sup>-1</sup>).
- D<sub>B</sub> - Coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> (m<sup>2</sup>/s).
- (c<sub>1</sub>-c<sub>2</sub>) - Diferença de concentração de CO<sub>2</sub> entre a superfície e a frente de carbonatação (kg/m<sup>3</sup>).

Os resultados obtidos através do modelo de Schiessl (1983) são representados na Tabela 5.5 e Figura 5.8.

Tabela 5.5 - Variáveis e valores determinados através do modelo de Schiessl (1983)

VARIÁVEL	UNIDADE	INTERVALO	VALOR BÁSICO	x (mm)	x <sub>c</sub> / t (x 10 <sup>-5</sup> )	k inf- k sup
a	kg/m <sup>3</sup>	110-75	90	133	5,8-8,5	3,03-3,67
b	kg.m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup>	(0,8-1,5)x10 <sup>-9</sup>	1,2x10 <sup>-9</sup>	20,0-10,7	4,7-8,9	-
D <sub>B,A</sub>	m <sup>2</sup> /s	(0,5-6,0)x10 <sup>-8</sup>	2,0x10 <sup>-8</sup>	3,3-40,0	7,1	1,67-5,80
c <sub>1</sub> -c <sub>2</sub>	kg/m <sup>3</sup>	(6-20)x10 <sup>-4</sup>	8,0x10 <sup>-4</sup>	10,0-33,3	7,1	2,90-5,29

Fonte: Adaptado Da Silva (1998).



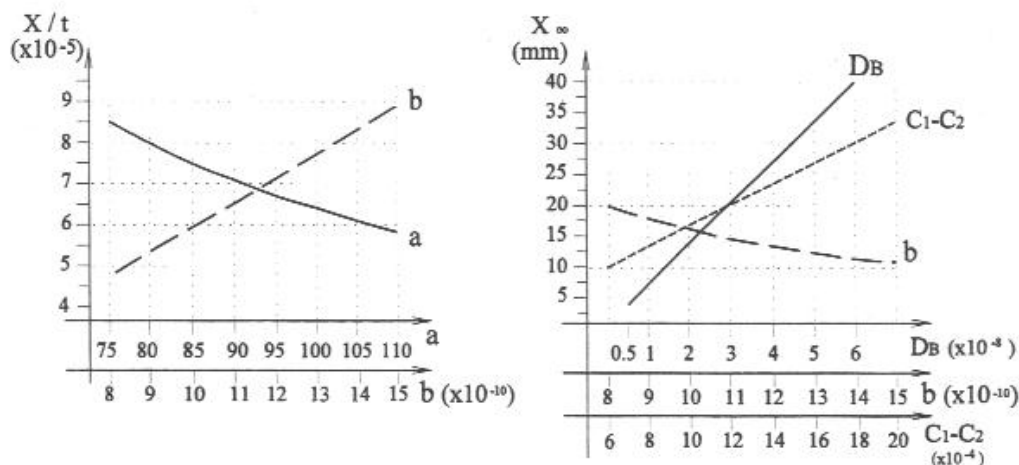


Figura 5.8 - Influência das variáveis no modelo de Schiessl (1983).  
 Fonte: Da Silva (1998).

Alguns autores propuseram valores distintos para a constante  $k$  da Equação 5.1, apresentados na Tabela 5.6 a seguir:

### 5.3.5 OUTROS ESTUDOS

Tabela 5.6 - Expressões para determinação da constante  $k$  (constante de carbonatação)

AUTOR	EQUAÇÃO	OBSERVAÇÕES
<b>CEB nº 238 (1997)</b>	$x = \sqrt{2k_1 k_2 k_3 \Delta c} \sqrt{\frac{D_{nom}}{a}} t \left( \frac{t_0}{t} \right)$ $D = B.C.\varepsilon^{4.5} \cdot (1 - \varphi(x))^{10.5}$ $B = 6.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{kg.s}$ <p><math>C</math> = consumo de cimento  <math>\varepsilon</math> = porosidade capilar  <math>\varphi</math> = Umidade Relativa</p>	$D_{nom}$ = difusão do $\text{CO}_2$ (20 °C e 65% U.R.) $a$ = material carbonatado ( $\text{kg/m}^3$ ) $c$ = diferença de concentração do $\text{CO}_2$ $k_1, k_2$ e $k_3$ = parâmetros para conteúdo da mistura, cura e relação $a/c$ $n = 0$ (interno); $n = 0.3$ (externo) $t_0$ = período de referência
<b>Parrott (1991) apud Figueiredo (2004)</b>	$d = 1875 \cdot \frac{k^{0.4}}{C} \cdot t_i^{-n}$ $n = 0,0491 r - 0,000374 r^2 - 1,01$	$d$ = profundidade de carbonatação (mm) $k$ = permeabilidade ao ar ( $10^{-16} \text{ m}^2$ ) $r$ = Umidade Relativa (%) $C$ = consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ )

Fonte: Adaptado Figueiredo (2004)

# CAPÍTULO 6

## ESTUDOS EXISTENTES DAS VARIÁVEIS

### 6.1 INTRODUÇÃO

Conforme pode ser identificado no capítulo 5, o número de variáveis que participam dos modelos matemáticos de previsão da vida útil de uma estrutura é grande. Isto, aliado às dificuldades de obter dados suficientes para caracterizá-las tem sido um dos fatores de retardo na aplicação dos métodos probabilísticos nos problemas de determinação de vida útil de estruturas.

Para contornar este problema temos que recorrer à compilação de 402.77657 9.49934 337.39999.

confiabilidade na estimativa da vida útil.

## **6.2 VARIÁVEIS AMBIENTAIS**

De acordo com Da Silva (1998), pode-se considerar que as variáveis ambientais de maior interesse para o estudo da durabilidade de componentes das estruturas podem ser consideradas pertencentes a dois grupos:

- 1- as condições climáticas: temperatura e umidade relativa;
- 2- composição do ar: sendo suas variáveis mais importante para a corrosão das armaduras, a concentração de agentes agressivos como CO<sub>2</sub> (gás carbônico) e Cl<sup>-</sup> (cloretos).

Dentre esses agentes a temperatura, umidade relativa e concentração de CO<sub>2</sub> serão objeto de estudo desse trabalho.

O concreto é um sistema complexo que muda temporalmente, principalmente com relação aos seus aspectos microestruturais. A porosidade do mesmo varia continuamente, em função das reações de hidratação do material, da penetração de água, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e agentes agressivos (Mehta, 1994), além de responder às ações impostas pelo meio ambiente, como as mudanças de umidade, pressão e temperatura. Desta forma, a modelagem do comportamento do concreto apresenta uma elevada variabilidade.

Andrade (1992) define o meio ambiente como sendo a localidade onde as estruturas estão inseridas e, segundo o CEB (1993), as condições ambientais estão diretamente relacionadas às ações físicas e químicas a que o concreto está exposto.

A durabilidade de uma estrutura depende fundamentalmente das características dos seus materiais constituintes e das condições ambientais onde a mesma está inserida. Sabe-se que as ações do meio ambiente influenciam no comportamento das estruturas. Uma alta porcentagem dos danos das estruturas é causada por projetos deficientes, com estimativas errôneas das ações ambientais.

Tanto as características ambientais, traduzidas principalmente pela temperatura e pela umidade relativa e também a concentração de CO<sub>2</sub>, quanto às condições de exposição, traduzidas por ambiente interno, externo protegido ou não da chuva ou submerso, têm uma influência efetiva no avanço do CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, na vida útil das estruturas.

### **6.2.1 TEMPERATURA**

Existem vários órgãos que realizam medições de temperatura. Para a caracterização da variável para um micro clima, pode-se tomar os dados do ponto de coleta mais próximo. Com o intuito de possibilitar a análise de cidades com distancia até 600 km, foram obtidas as temperaturas de quatro cidades: Uberlândia (MG), Vitória (ES), Belo Horizonte (MG) e Brasília (DF). Entretanto a caracterização será realizada somente para a cidade de Uberlândia.

#### **6.2.1.1 Influência da Temperatura nos Mecanismos de Deterioração**

É de conhecimento geral que a temperatura acelera as reações químicas. Pesquisa desenvolvida por Yoda, apud Parrott (1987), no Japão mostra que a profundidade de carbonatação é maior para condições internas quando comparada com as externas e é maior quando protegida da chuva em relação às estruturas não protegidas da chuva. Yoda avaliou a carbonatação em concretos com resistência de 25 MPa exposto em condições internas a uma umidade relativa de 40 a 70%, temperatura variando entre 10 a 30 °C, teor de CO<sub>2</sub> de 0,1%, atingindo 21 mm de profundidade de carbonatação após 20 anos de exposição, enquanto que o concreto em condições externas, com umidade relativa entre 18 a 88%, temperatura variando entre -4 a 35 °C e 0,03% de CO<sub>2</sub>, atingiu 10 mm em 20 anos.

Wierig, apud CEB (1997), obteve que a profundidade carbonatada em estruturas de concreto localizadas em ambiente interno (20 °C, 65% U.R.) é 40% superior à

profundidade carbonatada quando o concreto está em ambiente externo protegido da chuva, obtidos no concreto com idade de 8 e 16 anos. Kasami, apud Parrott (1987) obteve uma profundidade carbonatada média 40% inferior em ambiente externo não protegido da chuva quando comparado ao concreto em ambiente externo protegido da chuva.

A Figura 6.1 apresenta os resultados da profundidade carbonatada ao longo do tempo em estruturas localizadas em ambiente externo, submetidas a ciclos de molhagem e secagem e em ambiente interno, com umidade relativa de 70% (Schiessl apud Helene 1993). Pode-se observar que a profundidade carbonatada em ambiente externo corresponde a 59% da obtida em ambiente interno.

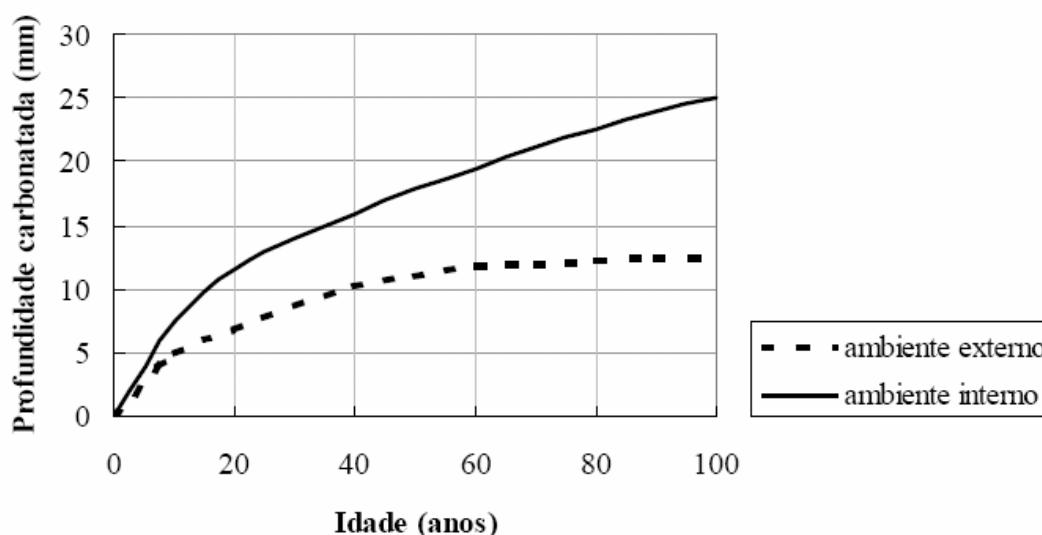


Figura 6.1 - Representação esquemática da evolução da carbonatação em componentes estruturais submetidos a ambientes interiores e a ambientes exteriores sujeitos a ciclos de molhagem e secagem (Helene, 1993).

Essa distinção do fenômeno para ambientes internos e externos, foi proposta por Schiessl (1983), com base em investigações experimentais nas quais observou que os concretos umedecem muito mais que secam por perda de água evaporada em períodos de seca. O resultado disso é que os concretos no exterior, submetidos a ciclos de molhagem e secagem, permanecem mais tempo úmidos, condição na qual há uma significativa redução da difusão do  $\text{CO}_2$  (gás carbônico), reduzindo a velocidade de carbonatação.

Segundo Schiessl (1983) e Mehta (1994), a profundidade carbonatada pode estar numa relação de 1: 0,7: 0,2 segundo esteja o concreto em ambiente de laboratório (20° C, U.R = 65% ), em ambiente externo protegido de chuvas ou em ambientes externos à intempéries, respectivamente.

Na realidade esta relação depende da frequência e duração dos períodos de molhagem e secagem do concreto, da temperatura ambiente e da própria porosidade do concreto que controla a velocidade de absorção e secagem do concreto da região superficial. Em outras palavras depende do micro clima e da atmosfera onde está localizada a estrutura.

Assim, a temperatura tem grande influência no desenvolvimento das reações químicas e deve ser considerada na análise da durabilidade das estruturas de concreto. Este fato faz com que as questões de deterioração química nas estruturas situadas em países de clima equatorial e tropical sejam mais graves e mais intensas que nas estruturas similares situadas em climas temperados.

Segundo Neville (1997), na grande maioria dos processos de natureza química, a temperatura age aumentando a sua cinética. Tal fato explica a razão pela qual estruturas localizadas nas regiões quentes deterioram mais rapidamente do que estruturas inseridas em regiões frias e temperadas.

A influência da temperatura na taxa de corrosão de uma célula de corrosão eletroquímica pode ser prevista através da Equação 6.1, obtida de uma simplificação da equação de Arrhenius:

$$r_1 = r_0 \cdot e^{-k \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad \text{Equação 6.1}$$

Onde:

- $r_1$  - Taxa de corrosão à temperatura  $T$ .
- $r_0$  - Taxa de corrosão à temperatura  $T_0$ .
- $k$  - Constante da reação.
- $T, T_0$  - Temperatura absoluta em  $^{\circ}\text{K}$ .

A Figura 6.2 mostra a influência da temperatura no aumento da agressividade ambiental admitindo-se que a espessura do cobrimento de concreto seja o fator determinante da taxa de deterioração. A escala das ordenadas foi definida admitindo que a agressividade é diretamente proporcional ao cobrimento necessário para produzir um risco constante de deterioração.

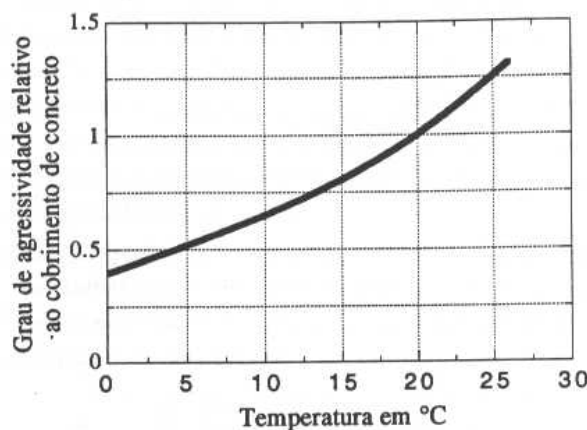


Figura 6.2 - Influência da temperatura na agressividade ambiental relativo ao cobrimento de concreto (Helene, 1993).

Em regiões urbanas densamente povoadas, os gases ácidos presentes na atmosfera são dissolvidos pela água de chuva e precipitam sobre as estruturas de concreto impregnando-as e contribuindo para a redução da alcalinidade original, favorecendo a aceleração do processo de carbonatação.

Da mesma forma, partículas em suspensão típicas de atmosferas marinha, urbana e industrial são depositadas por impactação nas superfícies das estruturas de concreto

contribuindo para a retenção de água, penetração por difusão e absorção capilar, neutralizando a superfície originalmente alcalina do concreto. É assim que estruturas similares, projetadas e construídas de forma semelhante apresentam diversidade na vida útil segundo o ambiente em que se encontram especialmente do ponto de vista da carbonatação.

Cabe observar que a carbonatação é um fenômeno direto e altamente dependente da cura, pois esta afeta majoritariamente as condições de hidratação dos primeiros milímetros superficiais. Desta forma a aparente desvantagem dos cimentos com adições, de menores reservas alcalinas, pode ser grandemente minimizada com uma boa e prolongada cura úmida.

Segundo Da Silva (1998), muitos fatores influem na temperatura do concreto, tais como: a mudança de temperatura atmosférica, radiação solar, as características térmicas do material, a velocidade do vento e as trocas de calor observadas dentro dos ambientes. Nota-se que tais fatores são muito variáveis, e que a determinação da temperatura superficial de um componente é extremamente difícil de ser realizada.

Deve-se considerar ainda a ação física que ocorre nas estruturas devido à variação de temperatura, tais variações, juntamente com a presença de ventos e ação da umidade do ambiente causam tensões térmicas e de retração que podem gerar fissuras nos elementos estruturais, facilitando o ingresso de agentes agressivos no concreto.

Além de problemas com relação à durabilidade, estudiosos citam que as estruturas de concreto inseridas em ambientes que apresentam altas temperaturas, e que não foram curadas adequadamente, podem apresentar uma redução de resistência entre 30 e 40%.

O processo corrosivo e a solubilidade dos sais são acelerados com o aumento da temperatura e as flutuações térmicas causam ciclos de expansão/contração e umedecimento/secagem na massa de concreto, causando microfissuras em virtude da incompatibilidade térmica existente entre os diversos componentes do mesmo.

Tanto as características ambientais traduzidas principalmente pela temperatura e pela



umidade relativa, quanto às condições de exposição têm uma influência importante na vida útil das estruturas de concreto armado atacadas por cloretos. Dentre essas características ambientais, a temperatura é um importante fator que deve ser levado em consideração.

Não existe um consenso com relação à influência da temperatura no processo de penetração de cloretos no concreto. Alguns autores consideram que com o aumento da temperatura ocorra uma minimização do coeficiente de difusão dos íons cloreto, em função de uma melhoria das condições micro estruturais do concreto.

Um experimento realizado por Hussain et al. (1995) mostrou que com o aumento da temperatura de cura de 20 °C para 70 °C há uma diminuição dos coeficientes de difusão de cloretos em concretos com elevados teores de cinza volante. Pereira (2001) e Hoffmann (2001) demonstraram experimentalmente que o coeficiente de difusão tende a diminuir com o aumento da temperatura de cura, em função da aceleração das reações de hidratação que ocorreram nos concretos avaliados.

Já outros pesquisadores consideram que o aumento da temperatura ambiente acarreta uma maior mobilidade iônica, aumentando assim a penetração de agentes agressivos no concreto (Da Silva, 1998).

De acordo com Andrade (2001), o efeito da temperatura pode atuar no concreto em dois momentos diferentes, a saber:

- Na etapa de cura dos corpos-de-prova, onde os espécimes são curados em temperaturas distintas e posteriormente submetidos aos ensaios de migração ou penetração acelerada de cloretos. Nessa situação, geralmente a penetração de cloretos tende a ser menor para os concretos curados em temperaturas mais elevadas, pela aceleração das reações de hidratação do cimento que ocorrem no interior do material (Pereira, 2001 e Hoffmann, 2001); e
- quando os corpos-de-prova são submetidos em condições padronizadas de cura (em relação à temperatura e à umidade relativa) até uma idade preestabelecida (28 dias, por exemplo), sendo ensaiados *a posteriori*. Nessa situação, o aumento da temperatura acarreta

um acréscimo da mobilidade iônica, ocasionando uma maior penetração de cloretos no concreto. Contudo, maiores investigações devem ser realizadas a fim de determinar qual o fenômeno – aumento da mobilidade iônica ou alterações micro estruturais – que exerce uma influência preponderante no transporte de íons cloreto nas estruturas de concreto armado.

De acordo com Tuutti (1982), a temperatura influencia no processo de corrosão de forma acentuada, aumentando a velocidade das reações e a movimentação das moléculas e dos íons. As variações de temperatura podem gerar um aumento da quantidade de água como resultado da condensação.

#### **6.2.1.2 Informações Sobre a Temperatura**

Para a análise da temperatura como uma variável nos casos de indisponibilidade de dados locais, pode-se adotar diversos procedimentos, tomando-se como base os dados mais próximos ou recorrer a mapas de isotérmicas para as médias.

Um aspecto que poderá ser fruto de um estudo mais apurado é a influencia do aumento da temperatura global no micro clima.

Como exemplo da aplicação do mapa, a Figura 6.3, mostra a temperatura do dia 21/12/2003 para todo o Brasil. Para a região na qual a cidade de Uberlândia está situada, de acordo com o mapa, as temperaturas no dia 21/12/2003 estiveram entre 30 e 32 graus centígrados ou por imprecisão do mapa, na faixa das isotérmicas de 28 graus centígrados.

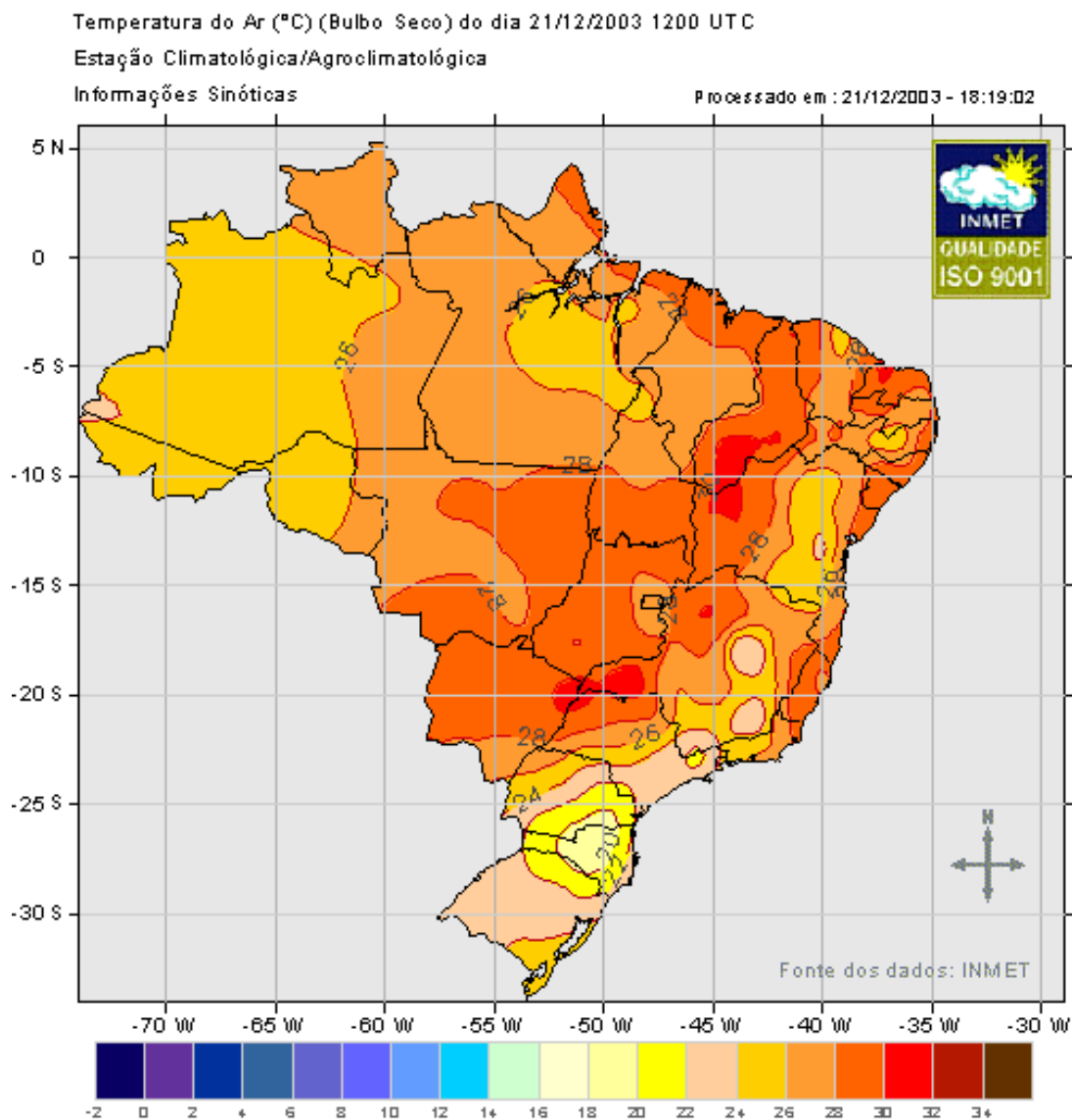


Figura 6.3 - Gráfico climatológico da Temperatura do Ar (°C) no dia 21/12/2003.  
 Fonte: Inmet (2006).

Na análise da temperatura global, deve ser abordado o aquecimento verificado pelo efeito estufa, produzido pelo aumento de gases, principalmente o CO<sub>2</sub>, na atmosfera. A Figura 6.4 (<http://pechincha.com.br/Filosofia/oefeito.htm>) mostra os pontos em que se detectou alteração na temperatura da superfície do planeta entre 1951 e 1993. Os pontos em vermelho significam acréscimo de temperatura, e os pontos em azul, decréscimo; de acordo com as dimensões, os pontos indicam variações de 2°C a 6°C.

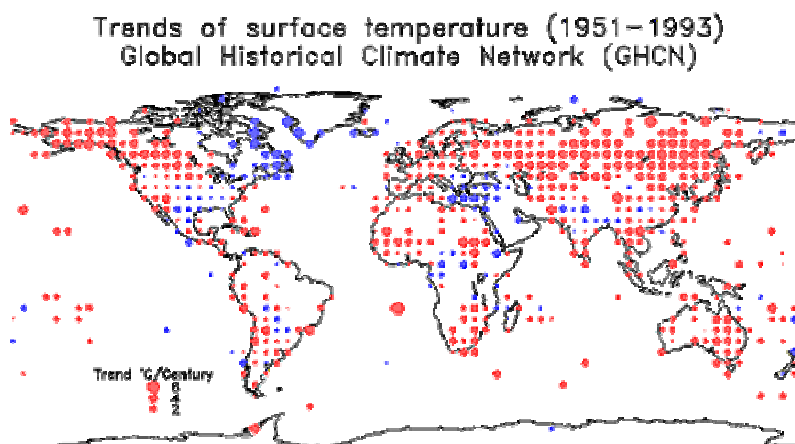


Figura 6.4 - Alterações da temperatura na superfície da Terra entre 1951-1993.  
Fonte: Global Historical Climate NetWork (GHCN).

Os mais avançados modelos matemáticos indicam que a temperatura média da Terra deverá aumentar em  $2^{\circ}\text{C}$ , devido ao efeito estufa, para uma duplicação da concentração de dióxido de carbono a partir do nível de 270 ppm (partícula por milhão) que era o valor inicial obtido nas primeiras medições.

Existe um consenso de que o aumento do efeito estufa só não é maior atualmente porque uma grande parte de  $\text{CO}_2$  é dissolvida nos oceanos e extraída pela vegetação. Sem esses mecanismos reguladores, há muito o ser humano já teria sozinho, desequilibrado totalmente o clima da Terra.

Os dados da Figura 6.5 (<http://pechincha.com.br/Filosofia/oefeito.htm>), que mostram a variação da temperatura global do planeta de 1851 a 1997 foram obtidos do trabalho conjunto dos pesquisadores Phil Jones (University of East Anglia), David Parker (United Kingdom Meteorological Office), John Christy (University of Alabama) e dados da NASA. A linha mais fina corresponde às temperaturas anuais médias, e a linha mais grossa à temperatura média a cada 5 anos.

Observa-se que, apesar de algumas oscilações, a tendência é de um crescimento contínuo na temperatura média da Terra. Entretanto, as variações, embora crescentes, podem ser consideradas de pouca influencia para análises de vida útil com períodos em torno de 50 anos, além do fato de que, em um estudo probabilístico, tais variações são consideradas pelo próprio processo.

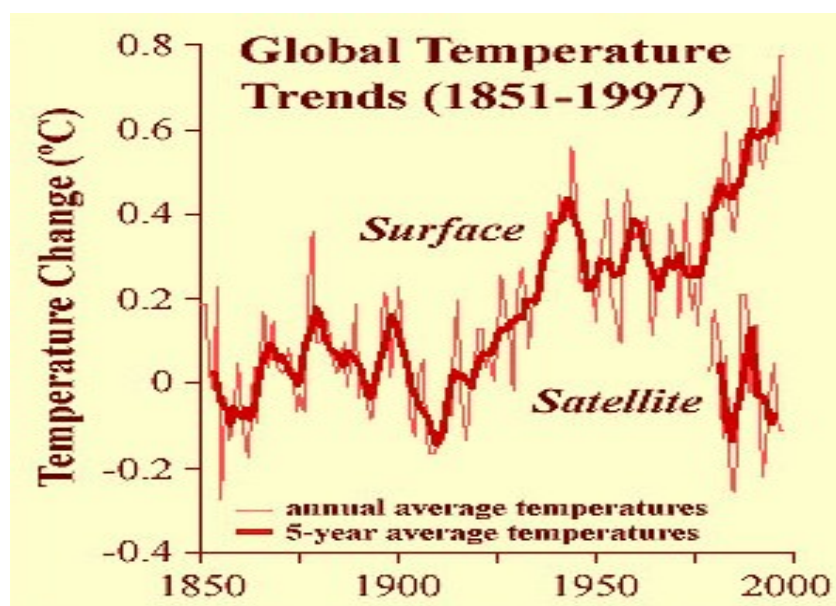


Figura 6.5- Alterações da temperatura na superfície da Terra entre 1851-1997.  
 Fonte: Global Historical Climate NetWork (GHCN).

Para uma estimativa do clima em uma cidade em particular, pode-se utilizar dados divulgados pelos órgãos relacionados à climatologia, um deles é o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET ([www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)) de cidades próximas. A partir dos dados fornecidos, foram elaborados gráficos climatológicos (Figuras 6.6, 6.7, 6.8), que mostram as temperaturas média, máxima e mínima mensal de Belo Horizonte - MG e Brasília - DF entre os anos de 1961-1990.

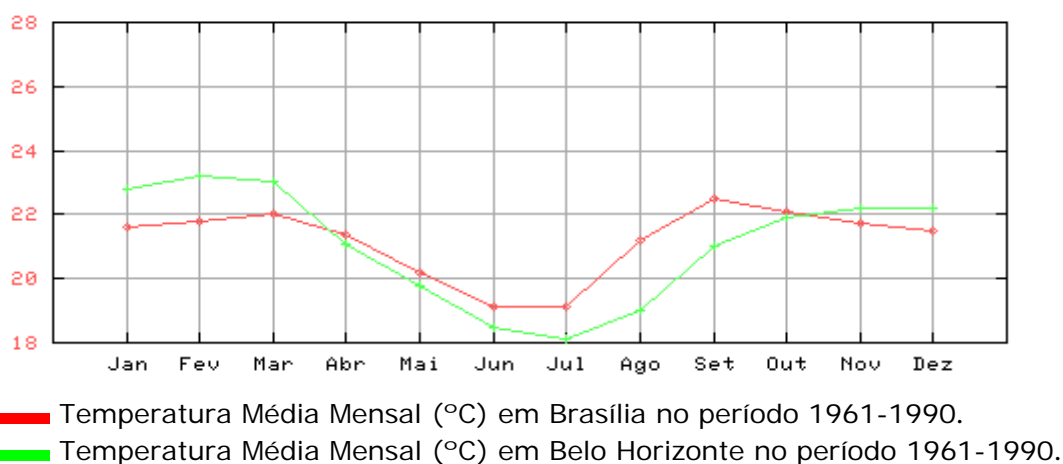


Figura 6.6 - Gráfico climatológico da temperatura média mensal de Brasília e Belo Horizonte de 1961-1990.

Fonte: Inmet (2006).

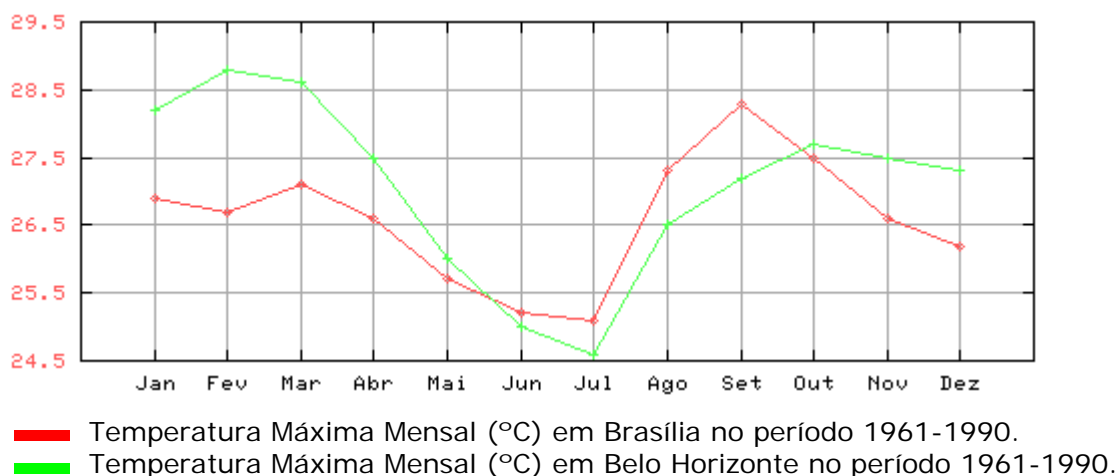


Figura 6.7 - Gráfico climatológico da temperatura máxima mensal de Brasília e Belo Horizonte de 1961-1990.

Fonte: Inmet (2006).

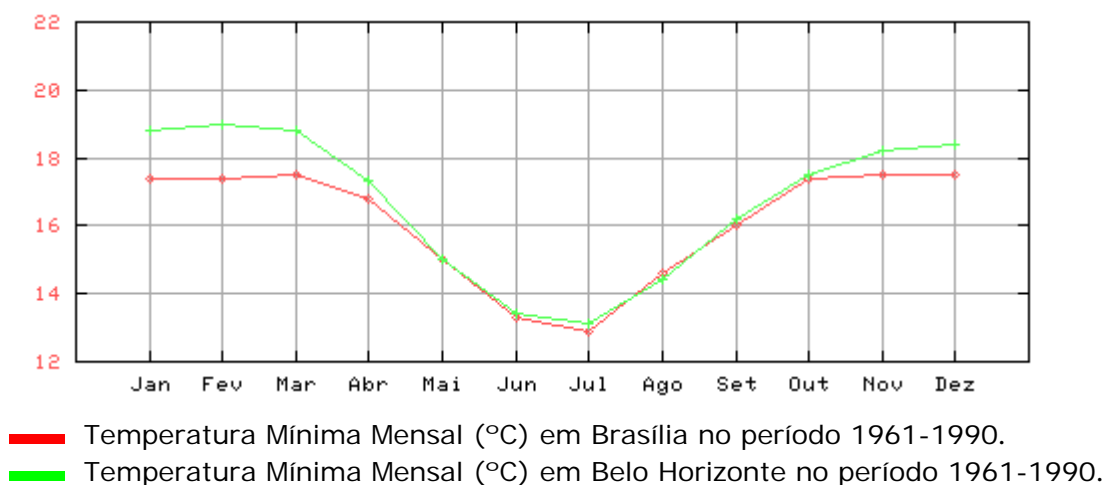


Figura 6.8 - Gráfico climatológico da temperatura mínima mensal de Brasília e Belo Horizonte de 1961-1990.

Fonte: Inmet (2006).

Os gráficos permitem concluir que, para uma distância relativamente grande entre as cidades, as temperaturas médias apresentam diferenças em torno de 2 graus centígrados nos meses do ano do período considerado. Portanto, para regiões mais próximas, o erro que se pode cometer adotando a média da medição mais próxima será pequeno.

### 6.2.2 CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub>

O CO<sub>2</sub> é um componente natural da atmosfera. É um gás incolor, inodoro, combustível, mais denso que o ar e bastante solúvel em água.

O CO<sub>2</sub> é produzido principalmente pela utilização de combustíveis fósseis (78%), e o consumo destes combustíveis apresenta um impacto significativo na qualidade do meio ambiente, no transporte (24%), na geração de eletricidade (24%) e na obtenção de energia para uso industrial (16%), comercial e doméstico (13%) de acordo com (CCE, 1992).

Outras fontes de geração de emissões de CO<sub>2</sub> são as instalações de disposição de resíduos sólidos urbanos, como é o caso dos aterros sanitários. O desmatamento é responsável por outros 22% do CO<sub>2</sub> produzido.

A poluição do ar, as mudanças climáticas, os derramamentos de óleo e a geração de resíduos tóxicos são resultados do uso e da produção de combustíveis. A poluição do ar das grandes cidades é, provavelmente, o mais visível impacto da queima dos derivados de petróleo.

Nos Estados Unidos, os combustíveis consumidos por automóveis e caminhões são responsáveis pela emissão de 67% do monóxido de carbono - CO, 41% dos óxidos de nitrogênio - NO<sub>x</sub>, 51% dos gases orgânicos reativos, 23% dos materiais particulados e 5% do dióxido de enxofre - SO<sub>2</sub>.

Além disso, o setor de transportes nos EUA também é responsável por quase 30% das emissões de CO<sub>2</sub>, um dos principais responsáveis pelo aquecimento global. A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera tem aumentado cerca de 0,4% anualmente.

O relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC de 2001 mostrou que o nível total de emissão de CO<sub>2</sub> em 2000 foi de 6,5 bilhões de toneladas.

A concentração de CO<sub>2</sub>, além do aumento nos últimos anos, sofre influência do horário e da altura. Estes aspectos devem ser avaliados quando do estudo da carbonatação visando obter uma análise do micro clima no qual o elemento estrutural está inserido.

Esta variável apresenta um grau mais elevado de dificuldade para sua caracterização, quando comparada com a temperatura e umidade relativa, o que consiste na pouca existência de estações de medida. Tais tipos de controle estão mais voltados para outros gases, tais como: O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>. Uma solução aproximada é utilizar dados de emissão do monóxido de carbono (CO) e utilizar conceitos de transformação de gases para obter a concentração de dióxido de carbono.

### 6.2.2.1 Informações Sobre a Concentração de CO<sub>2</sub>

Segundo dados da National Aeronautics and Space Administration - NASA ([www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)) nos últimos 400.000 anos a quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera manteve-se entre 180 e 290 ppmpv (parte por milhão por volume). No ano de 1960, esta proporção era de cerca de 280 ppmpv; no ano de 2000 a proporção tinha saltado para 360 ppmpv, isto é, tornou-se 31% maior.

Uma das estações de monitoramento de CO<sub>2</sub> mais antigas é de Mauna Loa, no Havaí. Na Figura 6.9 pode-se observar o crescimento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

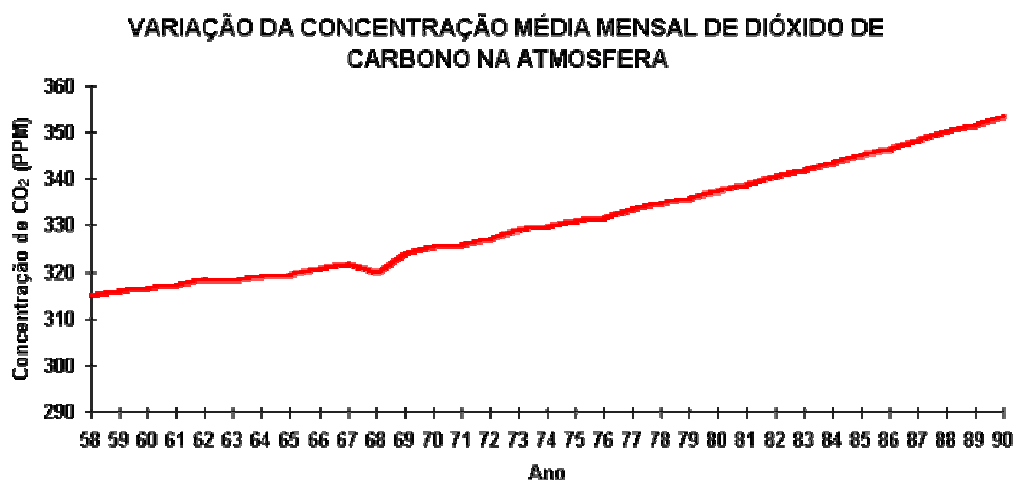


Figura 6.9 - Variação da concentração de CO<sub>2</sub> (média mensal) na atmosfera de 1958 a 1991.  
Fonte: Estação de monitoramento de Mauna Loa, no Havaí.



O Jornal Folha de São Paulo em sua seção Folha Ciência (São Paulo, 12 de outubro de 2004), publicou artigo baseado em estudos realizados por um grupo de pesquisa liderado pelo Dr. Charles Keeling, da Universidade da Califórnia em San Diego, que monitora, desde 1958, as concentrações de CO<sub>2</sub> em pontos afastados de fontes de poluição, como o vulcão extinto Mauna Loa, no Havaí.

Segundo o grupo de pesquisa, a taxa de acumulação de CO<sub>2</sub> na atmosfera da Terra aumentou acentuadamente entre os anos de 2002-2004, levantando entre os cientistas o temor de que os efeitos do aquecimento global possam manifestar-se mais rapidamente que o esperado. O incremento na taxa de CO<sub>2</sub> na atmosfera também foi detectado em outras estações de medição, como na Irlanda e na ilha norueguesa de Svalbard, no Ártico.

No mesmo artigo, é apresentado o gráfico da Figura 6.10, que contem as variações de CO<sub>2</sub>. Pelo gráfico, os níveis de CO<sub>2</sub> aumentaram mais de 2 ppm no período de 2001 a 2003. Nos anos anteriores, essa taxa de crescimento havia sido de 1,5 ppm, o que já era um fator elevado. As grandes variações na concentração de CO<sub>2</sub> estão associadas com picos de atividade industrial, que intensificam a queima de petróleo e derivados, ou a atuação mais intensa do El Niño, quando a liberação de carbono por decomposição de árvores supera a retirada de carbono do ar pela fotossíntese. Entretanto, neste período, o El Niño não esteve ativo, não podendo ser responsabilizado pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub>.

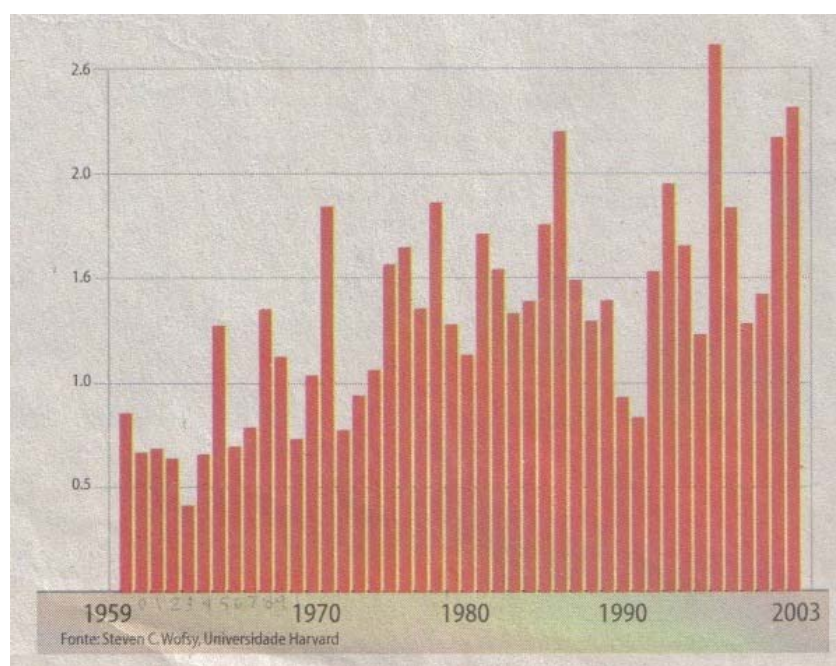


Figura 6.10 - Aumento das concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera (em partículas por milhão).  
Fonte: Jornal Folha Ciência, 12 de outubro de 2004.

Utilizando-se os dados extraídos do gráfico da Figura 6.10, foi traçado o gráfico da Figura 6.11 no qual foi inserida a equação de tendência. Para simplificar a equação ajustada foi uma reta na qual se pode extrair, pelo coeficiente da reta, que o aumento anual para o período foi 1,4 ppm.

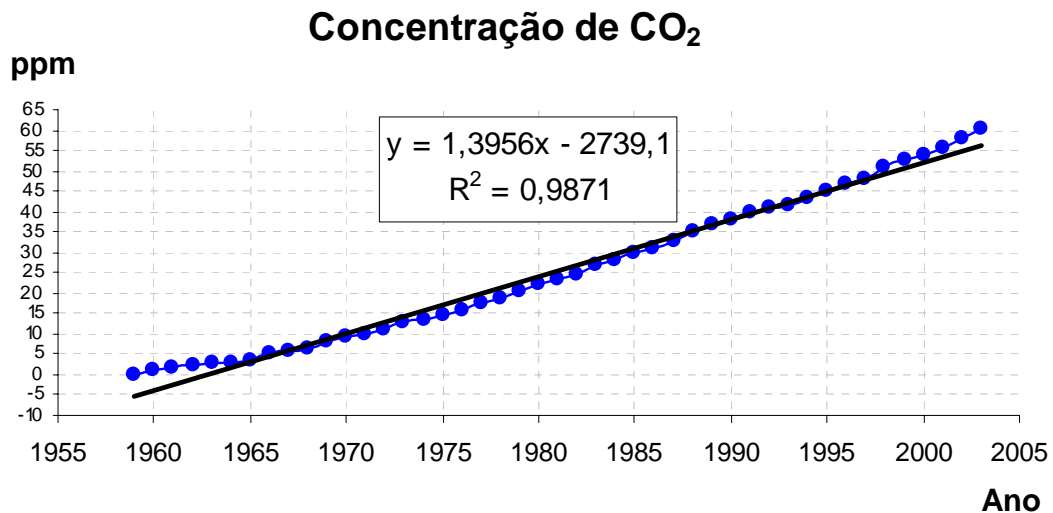


Figura 6.11- Aumento das concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera (dados obtidos da Figura 6.10) com curva de regressão.

De acordo com a Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologias Espaciais - FUNCATE, a concentração de CO<sub>2</sub> possui uma estratificação com a altura bem característica, sendo maior nos níveis mais baixos (e próximos à fonte de CO<sub>2</sub> para atmosfera que é o solo), decrescendo com a altura. Nos níveis próximos ao solo este valor é de aproximadamente 409 ppm, diminuindo para 394 ppm para o dossel da floresta. As medidas acima do dossel, na atmosfera livre, indicam um valor de aproximadamente 387 ppm. Dentro da vegetação, a concentração de CO<sub>2</sub> foi aproximadamente 5,5% maior nos níveis inferiores em relação ao topo da floresta, Figura 6.12.

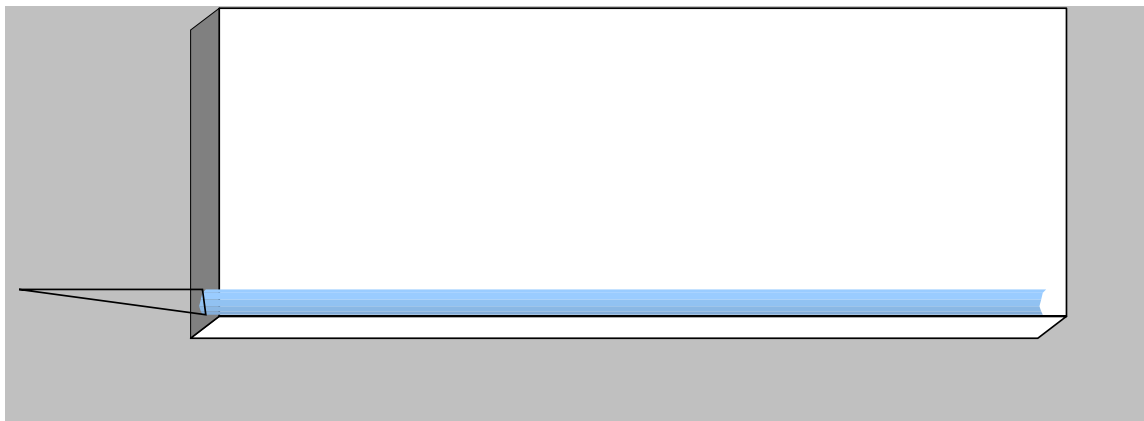


Figura 6.13-Concentração de CO<sub>2</sub> de acordo com a hora/local (altura a partir do solo).  
Fonte: Funcate-Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologias Espaciais (2006).

### 6.2.2.2 Valores de Concentração de CO<sub>2</sub> utilizados por pesquisadores

A concentração de CO<sub>2</sub> necessária para os estudos de vida útil é a do micro clima. Apesar da dificuldade de sua obtenção, vários pesquisadores utilizaram valores de referência em seus estudos.

De acordo com Tuutti (1982) a concentração de CO<sub>2</sub> está entre 0,033 e 0,1%. O valor inferior é para as zonas rurais e o superior para as áreas densamente ocupadas. O autor cita, por exemplo, alguns casos, onde nos silos que contém grãos a concentração de CO<sub>2</sub> pode chegar a 1%.

Bakker (1988) refere-se a valores entre 600 e 1000mg de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de ar; isto é 0,0325 e 0,0542% respectivamente. Papadakis et al (1992) comenta que na atmosfera normalmente a concentração de CO<sub>2</sub> está entre 0,03 e 0,05%. Helene (1993) apresenta valores de 0,03 e 0,05% para atmosfera rural e de 0,1 a 1,2% em regiões de tráfego intenso.

Os valores apresentados anteriormente se referem a concentração de CO<sub>2</sub> no exterior dos edifícios. As concentrações nos interiores dos edifícios, todavia são de difícil determinação, pois raramente existe interesse em estabelecer um controle de qualidade do ar no interior ou informação semelhante. Nos edifícios públicos esta tarefa é levada a sério por órgãos relacionados com a saúde, as condições de trabalho e a qualidade do ar.

Segundo Da Silva (1998) em uma primeira análise pode-se supor que no interior dos edifícios as concentrações de CO<sub>2</sub> são relativamente baixas e que não recebem diretamente os gases provenientes da queima de combustível. Na realidade nos edifícios fechados a contaminação do ar se deve a má circulação e a concentração de CO<sub>2</sub>, gerada pelo uso rotineiro, inclusive pode chegar a ser maior que no exterior destes edifícios.

Baseado nos dados da Generalitat de Catalunya (1997) obtidos no interior de 12 edifícios da cidade de Barcelona entre os anos de 1992 e 1997, após a compilação dos mesmos Da Silva (1998), apresenta média de 892,5 ppm, desvio-padrão de 230,9 ppm e coeficiente de variação de 0,26 para a concentração de CO<sub>2</sub> no interior dos edifícios.

Entre as poucas informações existentes sobre a concentração de CO<sub>2</sub> no interior dos edifícios, Parrott (1987) apresenta alguns valores de outros estudiosos. Para garagens e túneis estas concentrações podem estar entre 0,1 e 0,3%. Em edifícios a falta de ventilação pode resultar numa concentração de 0,1 a 0,3%. Assim, Parrott (1987) comenta que as estruturas poderão estar submetidas a concentração de CO<sub>2</sub> em torno de 0,2%.

Outro dado relevante que se pode ter sobre as emissões de CO<sub>2</sub>, que são de interesse neste estudo; é o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, Figura 6.14.

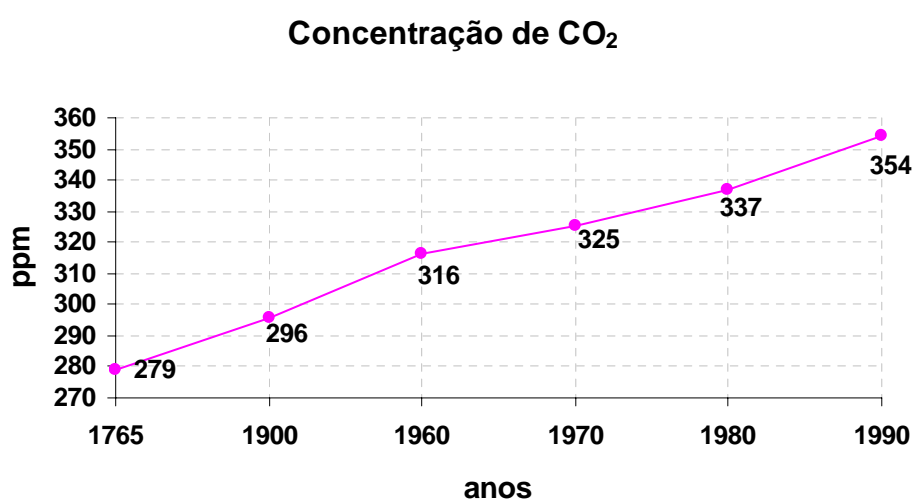
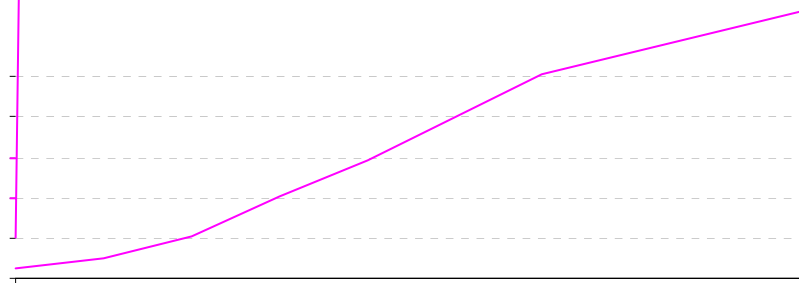


Figura 6.14 - Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera Baldasano (1996) apud Da Silva (1998).  
Fonte: Adaptado Da Silva (1998).

Da Silva (1998) explica que o gráfico apresentado é elaborado com dados de UNEP (1994), e estes valores correspondem à média entre as concentrações observadas nas estações de obtenção de dados distribuídos em vários continentes.

Na Figura 6.15, pode-se notar que a concentração média manteve em crescimento quase linear com uma proporção de 1,54 ppm (partícula por milhão) por ano.



### 6.2.3.1 Influência da Umidade Relativa nos Processos de Deterioração

De acordo com Tuutti (1982), a água presente nos poros do concreto participa da corrosão através do processo catódico de redução do oxigênio de acordo com a Equação 6.4.



Assim, a quantidade de água intervém no eletrólito, o que afeta a resistividade elétrica do concreto, e pode ser uma medida de permeabilidade de gases, especialmente o oxigênio. O líquido dos poros pode ser relacionado com a umidade relativa do ambiente, nas situações em que o concreto não está saturado (Perepérez et al., 1987 apud Da Silva 1998).

Uma vez iniciada a corrosão e despassivado o aço, a velocidade da deterioração é significativa, em termos de vida útil, para uma presença suficiente de oxigênio e acima de um mínimo de umidade.

No processo de corrosão das armaduras o teor de umidade ou oferta de eletrólito é significativo, pois fixa a disponibilidade de oxigênio nas proximidades da armadura e a resistividade do concreto.

As velocidades de corrosão máximas se darão em concreto com teores de umidade altos porém sem saturar os poros. Neste caso, o oxigênio chega livremente até a armadura e a resistividade do concreto é extremamente baixa para permitir o desenvolvimento pleno do processo corrosivo, Figura 6.16.

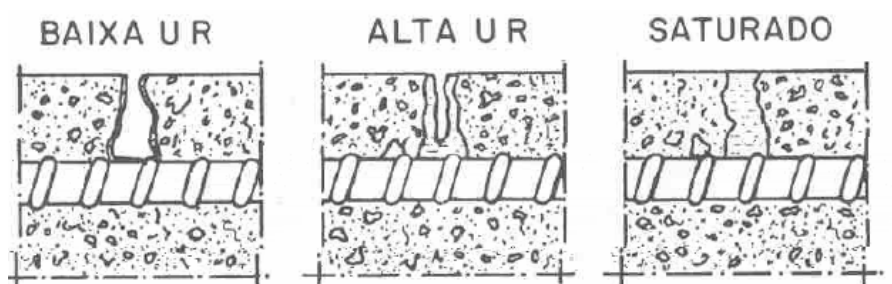


Figura 6.16 - Teor de umidade dos poros do concreto em função da umidade do ambiente. (Andrade, 1992).

O concreto é um material que absorve com facilidade a umidade do ambiente, mas em compensação seca muito devagar. Quando a umidade externa é constante, chega-se a estabelecer um equilíbrio entre o conteúdo de umidade do interior e a umidade relativa ambiental.

Assim, quando a umidade exterior oscila, o interior do concreto não pode acompanhar a troca à mesma velocidade e, conseqüentemente, só a capa externa da estrutura é que mantém equilíbrio com a umidade relativa exterior, conforme apresentado na Figura 6.17.

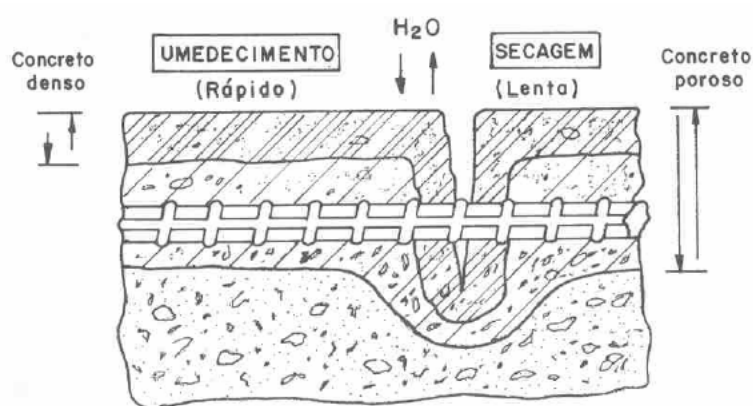


Figura 6.17 - Modelo simplificado do fenômeno da troca de umidade entre o cobrimento do concreto e o meio ambiente (Andrade, 1992).

O concreto tem uma resistividade elétrica mais elevada quanto menor a quantidade de água nos poros (Tuutti, 1982). Esta diminui diversas vezes a potência de 10 para valores de umidade relativa variando de 50% até próximo de 100%. A resistividade também é afetada pela relação água / cimento e a quantidade de cloros.

A umidade relativa mais baixa que 50%, é pouco provável que estimule a corrosão. Nos textos de Tuutti (1982) e Parrott (1987), estes comentam que a taxa de corrosão alcança os valores máximos, com umidade relativa próxima a 95% e geralmente o fornecimento de oxigênio é suficiente para garantir a seqüência da corrosão.

Nos estados próximos a saturação, a permeabilidade do concreto ao oxigênio diminui com o aumento da umidade relativa.



Segundo Figueiredo (2004) a umidade relativa do meio ambiente também influi consideravelmente no desempenho das estruturas. Primeiramente, durante a cura do concreto, pois irá influenciar no grau de hidratação do cimento e, subseqüentemente, na porosidade do concreto. Posteriormente, a umidade relativa influenciará no grau de saturação dos poros do concreto, controlando o ingresso de CO<sub>2</sub> para o interior do concreto e a resistividade elétrica do mesmo, fator limitante na transferência de cargas elétricas entre áreas catódicas e anódicas do aço, quando há um processo de corrosão ativo.

Segundo Da Silva (1998) a umidade relativa também influencia na carbonatação. Assim, a umidade relativa está relacionada com a taxa de carbonatação através do grau de umidade dos poros. Se os poros estão saturados, o CO<sub>2</sub> difunde em uma velocidade mais baixa comparada aos poros secos, sua difusão no ar é da ordem de 10<sup>4</sup> maior que na água Bakker (1988).

De acordo com Parrott (1987), a taxa de carbonatação alcança um máximo quando a umidade relativa está entre 50 e 70%. Assim mesmo, a umidade relativa onde se produz está taxa máxima, sofre a influência da relação água / cimento, sendo um pouco mais elevada quanto maior for esta relação.

A Figura 6.18 representa a influência da umidade na etapa de penetração do CO<sub>2</sub>. De acordo com Tuutti (1982), a carbonatação aumenta quando os poros capilares estão vazios e em baixa umidade relativa, a taxa de carbonatação é restrita à quantidade de água evaporada, que dissolve o dióxido de carbono. Assim, a taxa de carbonatação alcança um ponto máximo quando a umidade relativa se encontra a um valor intermediário.

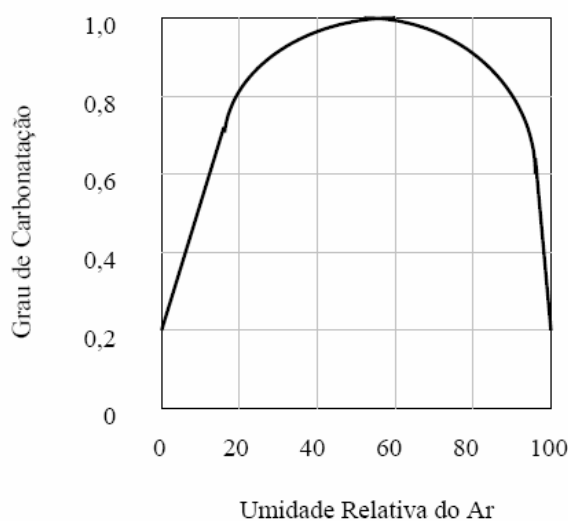


Figura 6.18 - Influência da umidade relativa na velocidade da carbonatação (Tuutti,1982).

### 6.2.3.2 Informações Sobre a Umidade Relativa

Segundo dados publicados pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (www.inmet.gov.br), a umidade relativa intermediária, entre 50 e 70%, ocorre em Brasília - DF durante quase todo o ano, comparada a cidade de Belo Horizonte - MG, no período de 1961-1990, como mostra a Figura 6.19.

A Figura 6.20 mostra a umidade relativa da cidade de Belo Horizonte - MG no período de 1931-1960.

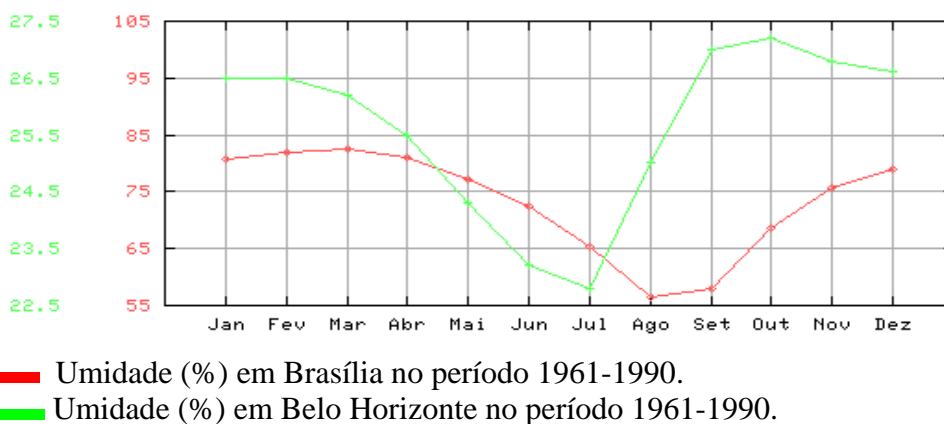


Figura 6.19 - Umidade Relativa (média mensal) em Brasília e Belo Horizonte no período de 1961-1990.

Fonte: INMET (2006).

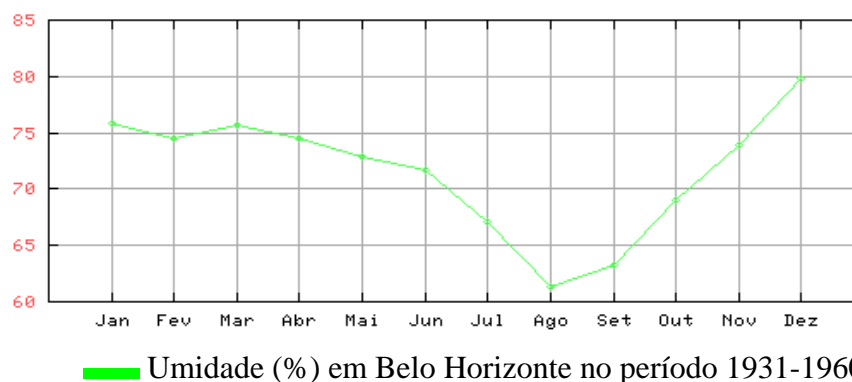


Figura 6.20 - Umidade Relativa em Belo Horizonte no período de 1931-1960.  
 Fonte: INMET (2006).

O período que se estende de junho a setembro apresenta normalmente valores baixos de umidade do ar sobre o estado de Minas Gerais visto que nos meses de abril a setembro compreende o período de estiagem sobre a região Sudeste do Brasil.

Geralmente, as regiões Oeste, Norte, Noroeste e Triângulo apresentam os menores índices de umidade relativa do ar em Minas Gerais nesta época do ano. Na cidade de Uberaba-MG em setembro de 1994 a umidade do ar chegou a 10%. Este foi o menor valor registrado no país naquele ano, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia.

De acordo com os dados obtidos no Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia - UFU, a Umidade Relativa Média Compensada (%) no período de 1997-2004 na cidade de Uberlândia - MG, é apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Umidade Relativa Média Compensada em Uberlândia-MG (1997-2004)

Ano/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
1997	83	76	80	75	73	75	63	51	56	60	60	78	69
1998	75	79	76	72	70	67	56	58	58	72	76	81	70
1999	78	73	80	72	66	66	65	57	62	66	70	74	69
2000	80	79	82	72	68	63	63	56	70	59	73	77	70
2001	73	69	74	64	66	65	58	51	58	64	76	78	66
2002	75	83	72	66	66	60	58	53	59	54	71	75	66
2003	84	70	81	74	66	60	56	58	57	62	74	73	68
2004	79	82	74	76	72	66	63	46	39	63	69	77	67
Média	78	76	77	71	68	65	60	54	57	63	71	77	68

Fonte: Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos-UFU.

### **6.3 FATORES QUE AFETAM A SOBRECARGA**

As sobrecargas atuantes nos edifícios residenciais podem ser classificadas em dois grupos: as ocasionadas pelo peso dos móveis e as ocasionadas pelo peso das pessoas. Segundo Páez (1982) apud Da Silva (1998) a carga máxima por metro quadrado em uma residência é independente do tamanho da mesma, do piso, assim como o nível social das famílias.

Os valores utilizados em projeto de estruturas de concreto armado preconizados pelas normas brasileiras foram obtidos antes de 1970. A sociedade brasileira vem experimentando uma acelerada transição demográfica, cujas implicações devem ser analisadas.

Nesse sentido e de modo particular, a Demografia tem ensejado sua parcela de contribuição, garantindo uma gama de indicadores representativos da dinâmica populacional que, além de descreverem uma situação de momento, sinalizam também os prováveis cenários prospectivos, quer sejam de curto, médio ou longo prazo.

A Organização das Nações Unidas vem promovendo a realização de diversas conferências que contemplam temas fundamentais da agenda contemporânea, colocando para os institutos nacionais de estatística o desafio de produzir indicadores que possam ajudar a compreender a realidade social de forma científica.

O objetivo do presente trabalho é a caracterização de variáveis relacionadas ao peso, a quantidade do mobiliário e dos eletrodomésticos inseridos nas edificações brasileiras, porém todas as informações apresentadas no texto a seguir serão importantes para a compilação final de dados.

A Agenda Habitat, adotada por 171 países na II Conferência das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos (Habitat II), realizada em Istambul, Turquia em 1996, colocou como umas das prioridades o levantamento de informações sobre as condições habitacionais da população da forma mais detalhada possível, de modo a fornecer insumos

para as políticas de habitação e saneamento, especialmente aquelas dirigidas às comunidades mais pobres.

Neste particular, as pesquisas domiciliares são consideradas os melhores instrumentos de captação de informações sobre estas condições.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE ([www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)) tem dedicado, nos censos decenais e nas pesquisas anuais amostrais, um espaço ao tema Domicílios cujas informações têm servido para fornecer um pano de fundo das questões habitacionais em todo o Brasil, estes dados visam ampliar o espectro de informações para melhor subsidiar as políticas públicas específicas, de acordo com a Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Distribuição Regional de domicílios, pessoas e números médio de pessoas, por domicílio, dormitório e localização do domicílio.

Grandes Regiões, Unidades da Federação e Regiões Metropolitanas	Total		Número médio de pessoas					
	Domicílios	Pessoas	Por domicílio			Por dormitório (1)		
			Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural
<b>Brasil (2)</b>	<b>49 142 171</b>	<b>173 751 317</b>	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>	<b>3,9</b>	<b>1,8</b>	<b>1,8</b>	<b>1,9</b>
<b>Norte (3)</b>	<b>2 469 430</b>	<b>10 134 661</b>	<b>4,1</b>	<b>4,1</b>	<b>-</b>	<b>2,1</b>	<b>2,1</b>	<b>-</b>
Rondônia	259 365	967 255	3,7	3,7	-	1,8	1,8	-
Acre	106 163	411 131	3,9	3,9	-	2,1	2,1	-
Amazonas	533 209	2 329 869	4,4	4,4	-	2,3	2,3	-
Roraima	69 335	288 132	4,1	4,1	-	2,2	2,2	-
Pará	1 133 380	4 678 323	4,1	4,1	-	2,1	2,1	-
Região Metropolitana de Belém	470 293	1 879 559	4,0	4,0	-	2,1	2,1	-
Amapá	109 491	498 877	4,4	4,4	-	2,2	2,2	-
Tocantins	324 048	1 230 027	3,8	3,8	3,9	1,9	1,9	2,0
<b>Nordeste</b>	<b>12 651 062</b>	<b>49 392 192</b>	<b>3,9</b>	<b>3,8</b>	<b>4,2</b>	<b>1,9</b>	<b>1,9</b>	<b>2,0</b>
Maranhão	1 372 297	5 863 231	4,3	4,2	4,4	2,1	2,1	2,3
Piauí	735 237	2 929 788	4,0	3,9	4,1	1,9	1,9	2,1
Ceará	1 978 353	7 778 494	3,9	3,8	4,3	1,9	1,9	2,0
Região Metropolitana de Fortaleza	841 331	3 177 556	3,8	3,8	4,1	1,9	1,9	2,0
Rio Grande do Norte	756 045	2 895 505	3,8	3,7	4,2	1,9	1,8	2,1
Paraíba	941 508	3 522 788	3,7	3,6	4,1	1,8	1,8	2,0
Pernambuco	2 121 766	8 169 094	3,9	3,7	4,2	1,9	1,9	2,1
Região Metropolitana de Recife	952 321	3 468 751	3,6	3,6	3,6	1,8	1,8	2,0
Alagoas	717 952	2 924 829	4,1	3,9	4,4	2,0	1,9	2,1
Sergipe	507 460	1 880 440	3,7	3,7	3,9	1,9	1,9	2,0
Bahia	3 520 444	13 428 023	3,8	3,7	4,1	1,9	1,9	2,0
Região Metropolitana de Salvador	890 981	3 187 881	3,6	3,6	3,9	1,9	1,9	2,2
<b>Sudeste</b>	<b>22 443 270</b>	<b>75 544 608</b>	<b>3,4</b>	<b>3,3</b>	<b>3,7</b>	<b>1,8</b>	<b>1,8</b>	<b>1,9</b>
Minas Gerais	5 279 968	18 582 998	3,5	3,5	3,7	1,7	1,7	1,8
Região Metropolitana de Belo Horizonte	1 349 102	4 824 907	3,4	3,4	3,4	1,7	1,7	1,7
Espírito Santo	937 431	3 254 717	3,5	3,4	3,8	1,8	1,8	1,9
Rio de Janeiro	4 784 727	14 908 908	3,1	3,1	3,3	1,8	1,8	1,9
Região Metropolitana do Rio de Janeiro	3 679 801	11 248 435	3,1	3,1	2,8	1,8	1,8	1,8
São Paulo	11 441 146	38 799 865	3,4	3,4	3,6	1,8	1,8	2,0
Região Metropolitana de São Paulo	5 421 661	18 658 886	3,4	3,4	3,9	1,9	1,9	2,3
<b>Sul</b>	<b>7 927 374</b>	<b>26 072 835</b>	<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	<b>3,5</b>	<b>1,7</b>	<b>1,7</b>	<b>1,7</b>
Paraná	2 942 535	9 922 162	3,4	3,3	3,6	1,7	1,7	1,8
Região Metropolitana de Curitiba	881 408	2 945 788	3,4	3,4	3,5	1,7	1,8	1,9
Santa Catarina	1 685 367	5 823 323	3,4	3,3	3,6	1,8	1,8	1,7
Rio Grande do Sul	3 319 472	10 527 350	3,2	3,1	3,3	1,7	1,7	1,7
Região Metropolitana de Porto Alegre	1 235 508	3 877 824	3,1	3,1	3,3	1,7	1,7	1,8
<b>Centro-Oeste</b>	<b>3 585 456</b>	<b>12 352 068</b>	<b>3,4</b>	<b>3,4</b>	<b>3,4</b>	<b>1,8</b>	<b>1,7</b>	<b>1,9</b>
Mato Grosso do Sul	649 244	2 168 590	3,3	3,3	3,4	1,8	1,8	1,9
Mato Grosso	726 010	2 861 168	3,7	3,7	3,6	1,9	1,8	2,0
Goiás	1 578 973	5 324 995	3,4	3,4	3,3	1,7	1,7	1,8
Distrito Federal	631 229	2 197 315	3,5	3,5	3,6	1,7	1,7	2,0

Fonte: IBGE - Diretoria de Pesquisas, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2003.

Segundo Figura 6.21, os domicílios urbanos brasileiros constituíam-se em 87,7% de casas e 11,7% de apartamentos. Entretanto, as Regiões Sudeste e Sul apresentavam uma maior proporção de apartamentos em relação ao restante do país. Este comportamento tem se repetido ao longo dos anos e tem como causa o maior adensamento populacional destas regiões.

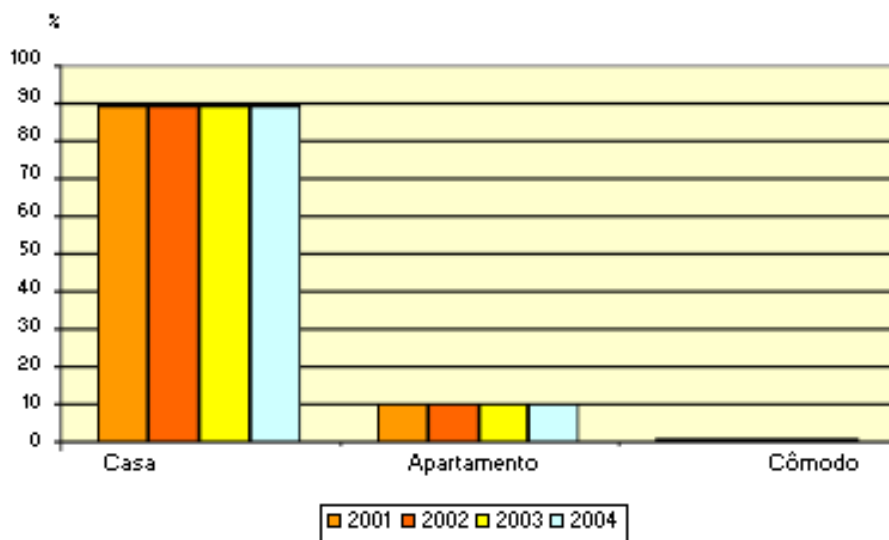


Figura 6.21 - Domicílios urbanos brasileiros, total e sua respectiva distribuição.  
Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2004.

Quanto ao tipo de material utilizados nas paredes, que afetam na definição do valor das cargas permanentes, não houve alterações em relação aos anos analisados. Destaca-se o predomínio da alvenaria no país, embora haja uma grande proporção de madeira aparelhada nas Regiões Norte (36,1%) e Sul (26,8%), enquanto na Região Nordeste esta variável foi de 0,9% e na Região Sudeste de 1,3%.

A condição de ocupação é um fator necessário de ser estudado com o enfoque de verificar a sua influência na variabilidade das sobrecargas. Em 2003, a ocupação manteve proporções semelhantes aos anos anteriores, apresentando 73,7% de domicílios próprios, 17,1% de alugados e 8,6% de cedidos, conforme Figura 6.22.

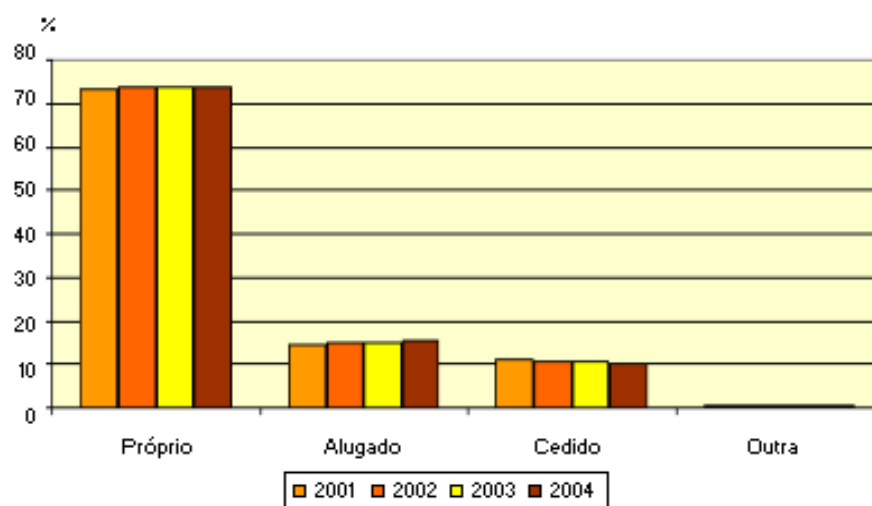


Figura 6.22 - Condições de Ocupação, no período de 2001-2004.

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2004.

Quanto à posse de bens duráveis, outro fator que é analisado visando a sua influencia nas cargas do mobiliário, em 2003, pode-se afirmar que 90,3% possuíam TV em cores; 91,7% possuíam geladeira; e 17,7% possuíam freezer, sendo que no Nordeste, este último percentual foi de 8,8%. Verifica-se, portanto, que alguns bens estão presentes na maioria das residências. Tal fato permite concluir que se pode definir um grupo de cargas que compõem a variável “carga dos móveis” com uma freqüência elevada e outro com baixa freqüência, de acordo com a Figura 6.23.

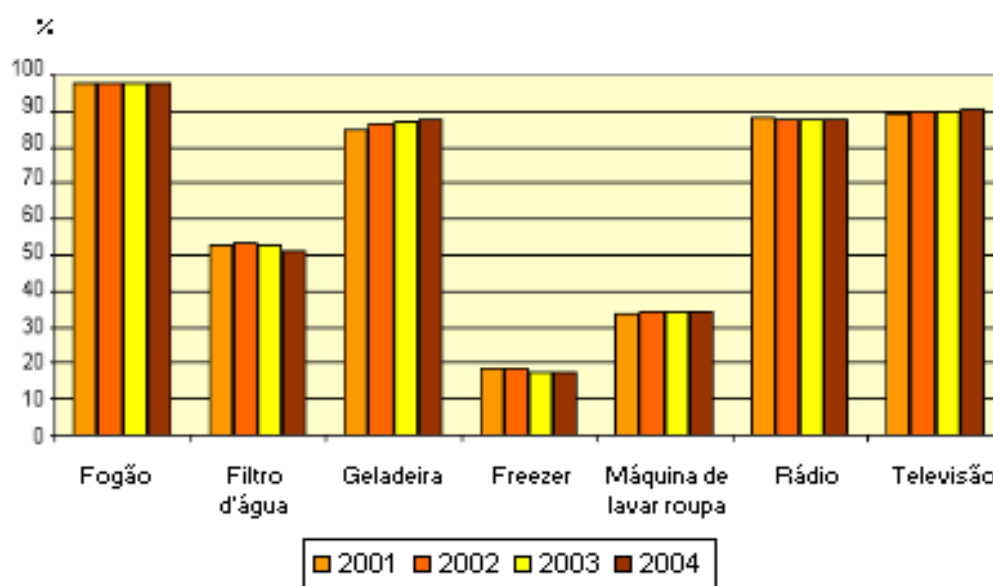


Figura 6.23 - Domicílios com Bens Duráveis (2001-2004).

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2004.



# CAPÍTULO 7

## OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

### 7.1 METODOLOGIA

Para a obtenção dos dados necessários para a caracterização das variáveis enfocadas neste trabalho, foram utilizados dois procedimentos. O primeiro consistiu no levantamento de dados coletados por órgãos especializados. Um grupo de dados foi organizado de acordo com as necessidades de processamento, como foi o caso da temperatura e da umidade relativa. Outro grupo de dados, do CO, foi utilizado para gerar resultados da concentração de CO<sub>2</sub>. A transform

Os dados obtidos segundo os procedimentos descritos foram analisados com o emprego do programa de análise estatística *Statgraphics* (MANUGISTICS, 2000). O programa permitiu a definição da função de densidade de probabilidade que, mediante o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, melhor se ajustou aos dados obtidos, bem como os parâmetros de definição da variável ajustada. Este teste foi empregado por ser específico para distribuições contínuas, que é o tipo procurado neste trabalho.

## 7.2 TEMPERATURA

As informações apresentadas no capítulo 6, embora sejam relevantes para uma comparação entre as cidades citadas, não são suficientes para a realização da caracterização da variável pois são resultados de processamento, portanto, contemplam um estudo estatístico prévio. Para a análise de dados referente a variável temperatura são necessários os dados primários, ou seja, todas as medições realizadas.

Desta forma, foram utilizados dados obtidos pelo Laboratório de Climatologia da Universidade Federal de Uberlândia - UFU (LC-UFU), no período compreendido entre os anos de 1998 a 2005, onde neste laboratório são feitas 5 (cinco) leituras ao longo do dia às 09:00, 15:00 e 21:00 horas, temperatura máxima e temperatura mínima.

No estudo, foram utilizadas as três leituras, mais a temperatura mínima, pois verificou-se que se obtêm resultados muito próximos quando tomadas leituras de hora em hora. Para comprovar o procedimento foram analisados os dados da temperatura obtidos na CST (Companhia Siderúrgica Tubarão) em Vitória - ES, onde as leituras são realizadas de hora em hora. Como exemplo, foram comparados os anos de 1998 e 1999, obtendo-se a média e o desvio-padrão considerando as leituras de hora em hora e as leituras nos mesmos horários das medições realizadas no LC-UFU, conforme Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Comparação entre a Temperatura Média e Desvio-padrão para medições horárias e a cada 6 horas para a cidade de Vitória-ES.

Ano	Leituras por hora		Leituras em períodos de 6 horas	
	Média (°C)	Desvio-padrão (°C)	Média (°C)	Desvio-padrão (°C)
1998	24,31	3,36	24,27	3,36
1999	24,21	3,39	24,36	3,40

Pelos resultados obtidos nota-se que os valores das médias sofreram uma variação insignificante, bem como, os desvios padrão foram semelhantes. Assim, considera-se satisfatório o procedimento utilizando-se a média e desvio padrão de quatro valores diários: leituras às 09:00 , 15:00 e 21:00 horas e a temperatura mínima.

Desta forma, a partir dessa análise com os dados na LC-UFU foram obtidos a média, o desvio-padrão e a função densidade de probabilidade melhor ajustada, anual e para o período de 1998 a 2005, conforme Tabela 7.2..

Tabela 7.2 - Caracterização Probabilística da Temperatura da cidade de Uberlândia-MG.

Ano	Média (°C)	Desvio-padrão (°C)	COV	Função densidade de probabilidade	Kolmogorov - Smirnov
1998	23,2	4,63	0,19	gama	0,122
1999	22,7	4,58	0,20	normal	0,17
2000	22,6	4,33	0,19	normal	0,004
2001	22,9	4,34	0,18	normal	0,03
2002	23,4	4,40	0,18	normal	0,04
2003	22,6	4,36	0,19	normal	0,001
2004	22,4	4,32	0,19	normal	0,013
2005	22,8	4,21	0,18	normal	0,006
1998-2005	22,8	4,41	0,19	normal	-

Os valores das médias encontrados indicam uma pequena variação anual e não se caracterizou uma tendência, seja de crescimento ou estagnação. Nota-se que uma função densidade normal foi a que melhor ajustou-se aos dados da maioria dos anos estudados e a média e desvio padrão do período podem ser considerados representativos desta variável, de acordo com as Figuras 7.1 e 7.2.

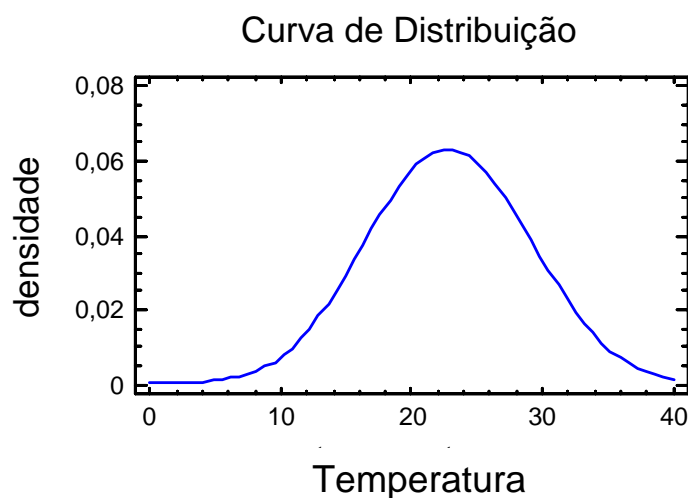


Figura 7.1 - Curva de distribuição dos dados de temperatura no período de 1998 - 2005.

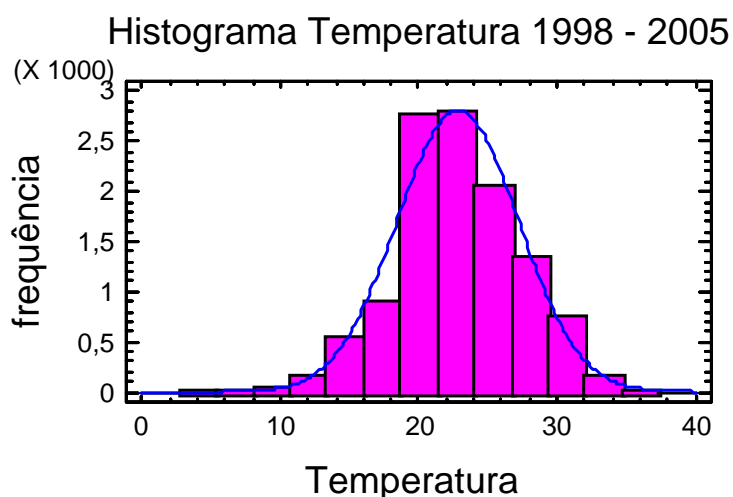


Figura 7.2 – Histograma da temperatura no período de 1998 - 2005 com função normal ajustada.

O estudo comparativo entre as temperaturas médias de várias cidades tem interesse para uma possível extrapolação da caracterização de variáveis ambientais. Entretanto a situação adequada é utilizar os dados da cidade em estudo. Para uma melhor visualização do comportamento da temperatura média, foram elaborados os gráficos das Figuras 7.3, 7.4 e 7.5 para a cidade de Uberlândia-MG e Vitória-ES.

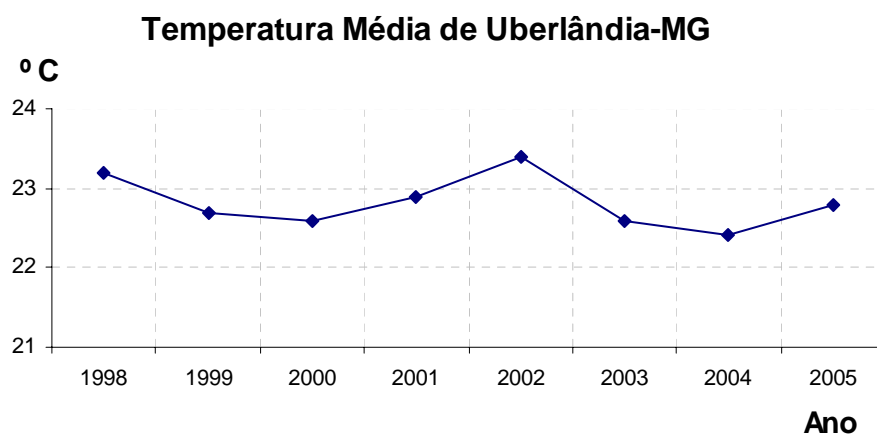


Figura 7.3 - Temperatura Média de Uberlândia-MG no período de 1998 a 2005.

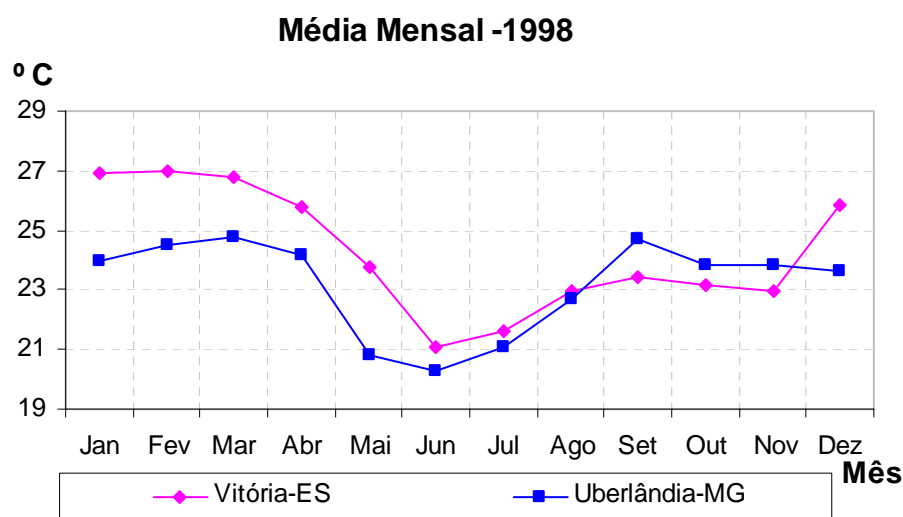


Figura 7.4 - Temperatura Média mensal de Uberlândia-MG e Vitória-ES no ano de 1998.

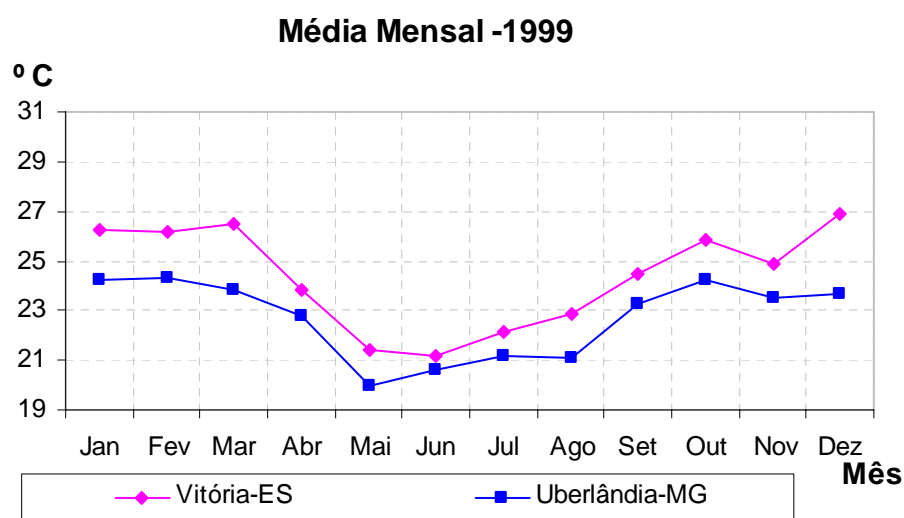


Figura 7.5 - Temperatura Média mensal de Uberlândia-MG e Vitória-ES no ano de 1999.

Considerando que a concentração de CO<sub>2</sub> será estudada com dados da cidade de São Paulo, foi elaborado o gráfico, apresentado na Figura 7.6, comparando as temperaturas médias mensais do ano de 2005 com a cidade de São Paulo - SP, com dados obtidos da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB ([www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br)).

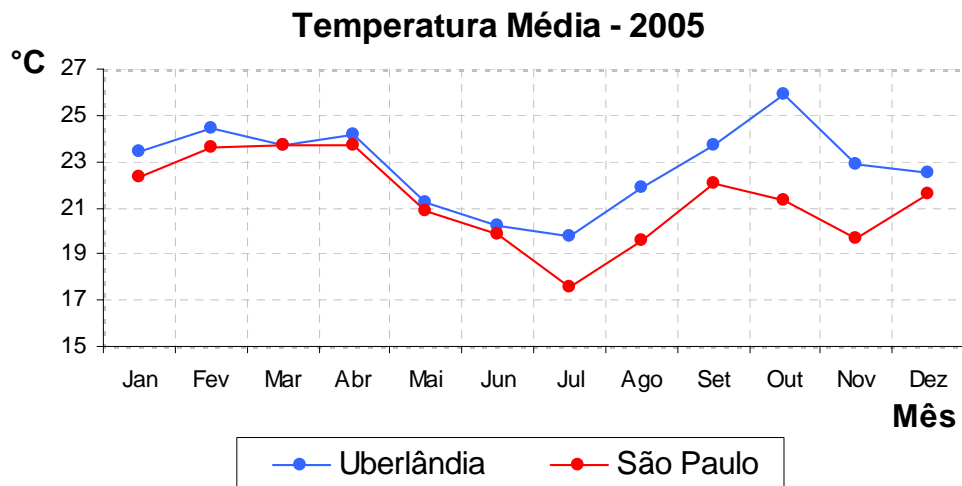


Figura 7.6 - Temperatura Média mensal de Uberlândia-MG e São Paulo-SP no ano de 2005.

A temperatura foi obtida em condições exteriores abertas, o que pode diferir com as condições no interior dos edifícios que atua mais na vida útil das estruturas.

Segundo Da Silva (1998) as temperaturas exteriores na cidade de Barcelona - Espanha de 1992 a 1994, apresentaram média de 16,5 °C e desvio-padrão de 5,3 °C, enquanto que a temperatura obtida no interior de 12 edifícios entre 1992 e 1997 apresentou média de 23,9 °C e desvio-padrão de 1,2 °C.

Este fato decorre de que no interior dos edifícios busca-se uma temperatura mais próxima do conforto térmico. Para o Brasil cuja temperatura exterior é mais elevada, provavelmente a diferença entre a temperatura exterior e a interior não será tão grande. Outro fato que deve ser mencionado é a variabilidade da temperatura exterior que é sempre maior do que a temperatura no interior dos edifícios, portanto, a utilização da temperatura média anual obtida nas estações climatológicas pode ser considerada como válida e bem aproximada das condições no interior dos edifícios, entretanto, tal consideração deve ser comprovada por meio de coleta de dados.

### 7.3 UMIDADE RELATIVA

De maneira similar à temperatura, foi realizado o estudo da Umidade Relativa da cidade de Uberlândia - MG, com base nos dados obtidos no LC-UFU, onde as leituras são feitas ao longo do dia às 09:00, 15:00 e 21:00 horas, e a média diária.

A partir da análise desses dados foram obtidos a média, o desvio-padrão e a função densidade de probabilidade melhor ajustada, anualmente no período compreendido entre os anos de 1998 a 2005, obtendo-se os resultados, conforme Tabela 7.3..

Tabela 7.3 - Resultados Estatísticos da Umidade Relativa para a cidade de Uberlândia-MG.

Ano	Média (%)	Desvio-padrão (%)	COV	Função densidade de probabilidade	Kolmogorov - Smirnov
1998	64,00	17,78	0,27	normal	0,0016
1999	62,26	16,53	0,26	normal	0,09
2000	67,48	16,30	0,24	normal	0,013
2001	64,55	16,46	0,25	weibull	0,008
2002	64,15	16,78	0,26	normal	0,029
2003	66,13	17,57	0,26	weibull	0,01
2004	65,37	18,42	0,28	normal	0,06
2005	66,48	16,68	0,25	weibull	0,011
1998-2005	65,06	17,15	0,26	normal	0,01

As Figuras 7.7 e 7.8 apresentam a distribuição normal ajustada e a curva de distribuição para a umidade relativa de Uberlândia - MG no período de 1998 a 2005.

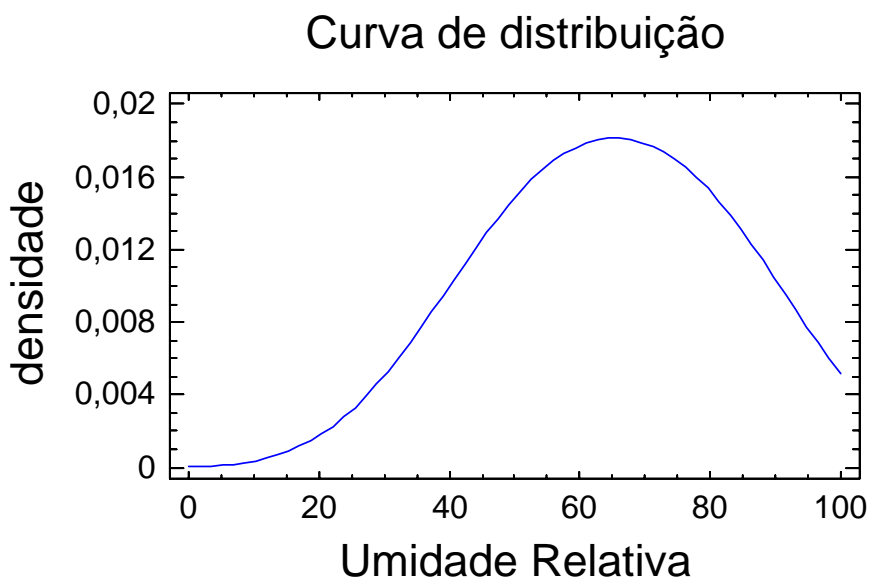


Figura 7.7 - Curva de distribuição dos dados de Umidade relativa 1998 - 2005.

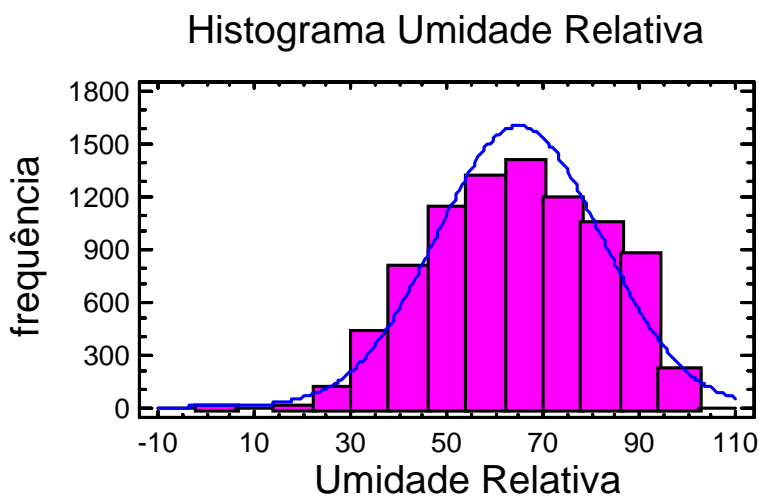


Figura 7.8 - Histograma da Umidade Relativa no período de 1998 - 2005 com função normal ajustada.

A Figura 7.9 apresenta a variação da umidade relativa média anual para a cidade de Uberlândia - MG.



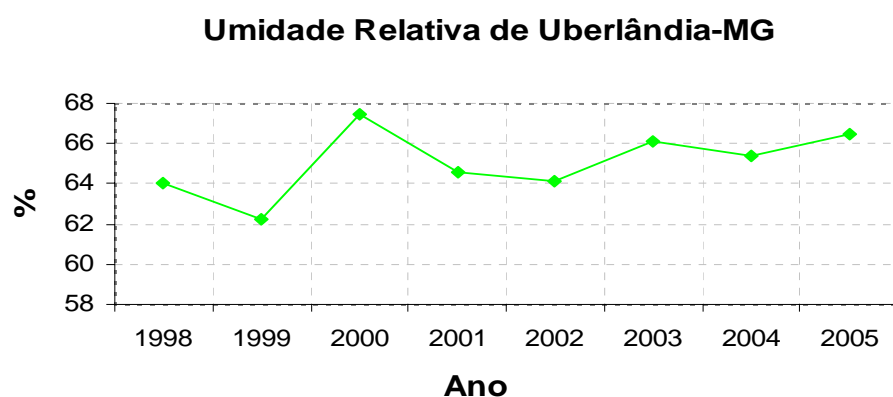


Figura 7.9 - Umidade Relativa Média anual no período de 1998 a 2005.

Com a mesma justificativa que foi realizada a comparação entre as médias de temperatura, foi elaborado o gráfico da Figura 7.10, com as umidades relativas de Uberlândia - MG e de São Paulo - SP com base nos dados obtidos da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB ([www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br)) e do Laboratório de Climatologia - LC da UFU.

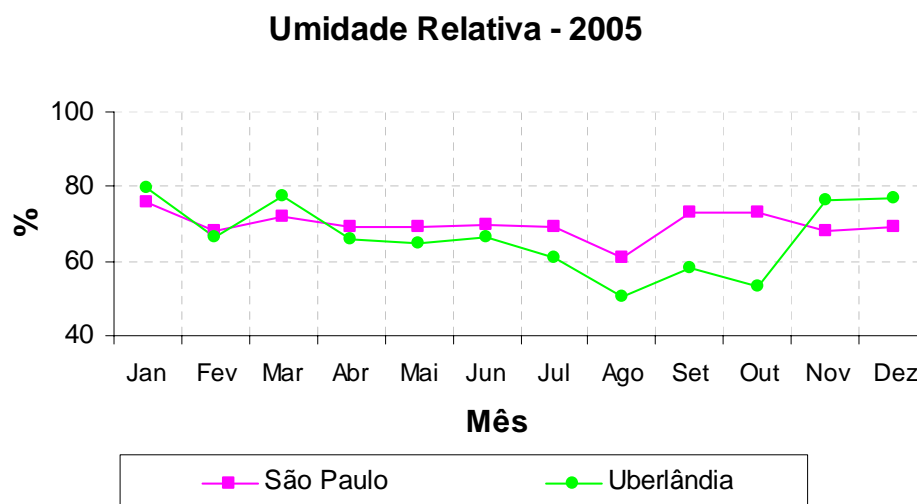


Figura 7.10 - Umidade Relativa de Uberlândia-MG e São Paulo no ano de 2005.

Pelos gráficos da Figura 7.10, pode-se verificar que a umidade relativa das duas cidades tem valores próximos exceto no período de agosto a outubro. A umidade relativa média para o ano de 2005 foi de 66,4% para Uberlândia e 69,7% para São Paulo, portanto, pela proximidade dos valores e pelo grande coeficiente de variação desta variável que apresenta

valores também próximos para as duas cidades, os resultados gerados pelos modelos de deterioração serão muito próximos.

## 7.4 CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub>

As concentrações de CO<sub>2</sub> sofrem alterações ao longo dos anos, como visto no item 6.2.2. Mesmo as concentrações de CO<sub>2</sub> nas grandes cidades sendo mais elevadas que a média a sua medição ainda é recente em muitos países.

A atenção sempre é voltada para os gases poluidores como CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, entre outros. Devido a esta dificuldade, serão apresentados os resultados, obtidos de forma indireta, para a cidade de São Paulo - SP, que além de ser uma das maiores cidades do mundo e com uma grande frota de veículos, é uma das poucas com medições de emissões de gases.

Segundo Da Silva (1998) para a determinação da concentração de CO<sub>2</sub> no exterior dos edifícios, tem-se realizado um estudo obtido através dos valores médios diários das estações de medição de CO. Moragues (1996) propõe um algoritmo para a determinação da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, que busca um valor representativo de cada estação para um período considerado.

Para que ocorra equivalência entre as concentrações de CO e CO<sub>2</sub>, considera-se que o CO<sub>2</sub> é um poluidor primário e secundário simultaneamente, pois sua concentração depende da quantidade emitida e da transformação de CO em CO<sub>2</sub>. A emissão direta é obtida pela Equação 7.1.

$$\text{CO}_2^{\text{E}} = \text{CO} \times 80 \quad \text{Equação 7.1}$$

Onde:

CO<sub>2</sub><sup>E</sup> = Concentração de CO<sub>2</sub> estimada com base na emissão de CO.

CO = Monóxido de carbono.

O grau de transformação de CO em CO<sub>2</sub> é considerado seguro e independente da concentração de CO neste ponto, devido à lenta cinética de transformação do processo a temperatura ambiente. A concentração de CO<sub>2</sub> devido ao processo de transformação é considerada igual a 450 mg/m<sup>3</sup> para centros de cidades populosas. Este valor pode variar de cidade para cidade, porém trata-se de um referencial, e este deve ser ajustado por região. A concentração final é a soma das duas concentrações, Equação 7.2.

$$\text{CO}_2^{\text{F}} = \text{CO}_2^{\text{E}} + 450 \quad \text{Equação 7.2}$$

Onde:

$\text{CO}_2^{\text{E}}$  = Concentração de CO<sub>2</sub> estimada com base na emissão de CO.

$\text{CO}_2^{\text{F}}$  = Concentração final de CO<sub>2</sub>.

A Tabela 7.4 apresenta os resultados da análise feita segundo a metodologia descrita anteriormente, os dados de concentração de CO, para transformação de CO em CO<sub>2</sub> foram obtidos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB ([www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br)), referente aos anos de 1997 a 2005.

Tabela 7.4 - Concentração de CO<sub>2</sub> em São Paulo - SP (1997 - 2005).

Ano	N	Média (ppm)	Desvio - Padrão (ppm)	COV	F.D.P	Kolmogorov - Smirnov
1997	360	1462	62,22	0,04	normal	0,99
1998	349	1030	5,65	0,005	normal	0,99
1999	340	1142	107,48	0,09	normal	0,99
2000	349	966	50,91	0,05	normal	0,99
2001	362	1214	16,97	0,01	normal	0,99
2002	353	1030	28,28	0,02	normal	0,99
2003	363	1014	16,97	0,01	normal	0,99
2004	320	954	56,56	0,05	normal	0,99
2005	295	938	135,76	0,14	normal	0,99
1997 a 2005	3091	1083	168,08	0,15	log-normal	0,34

N= Número de Observações

F.D.P= Função densidade de probabilidade

No Brasil a maioria dos edifícios residenciais tem boa ventilação, portanto a concentração de CO<sub>2</sub> no interior dos edifícios pode ser considerada como sendo similar aos valores obtidos nas estações de medição.

O único ambiente interno que deverá ser mais bem estudado são as cozinhas, que mesmo com uma ventilação adequada tem um gerador de  $\text{CO}_2$  ativo quando da cocção. As Figuras 7.11 e 7.12 apresentam a função log - normal ajustada e a curva de distribuição para os dados relativos a concentração de  $\text{CO}_2$  na cidade de São Paulo - SP no período de 1997 a 2005.

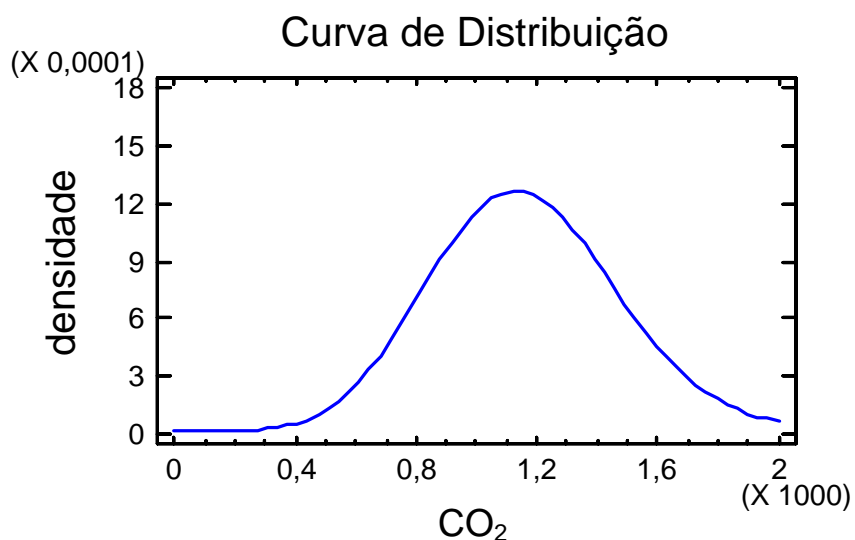


Figura 7.11 - Curva de distribuição dos dados de concentração de  $\text{CO}_2$  no período de 1997 - 2005.

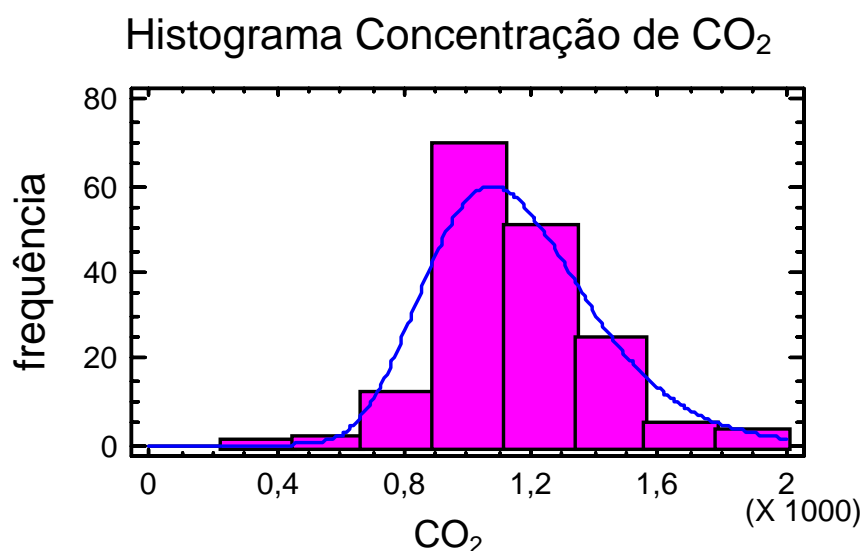


Figura 7.12 - Histograma da concentração de  $\text{CO}_2$  no período de 1997 - 2005 com função log - normal ajustada.

## **7.5 SOBRECARGA**

Os levantamentos de dados em relação as variáveis de sobrecarga foram feitos através de medição manual “in loco” de 74 apartamentos de edifícios de uso residencial localizados nas cidades de Araguari-MG e Uberlândia-MG e todo seu mobiliário, número de habitantes e peso por pessoa de cada apartamento.

### **7.5.1 PESO DOS MÓVEIS**

Os estudos feitos relacionados a variável de sobrecarga peso dos móveis, foram realizados através do levantamento de dados em 4 edifícios de uso residencial, totalizando 74 apartamentos, localizados nas cidades de Uberlândia - MG e Araguari - MG. Estes edifícios foram construídos entre os anos de 1997 e 2004, os apartamentos possuem áreas entre 30, 60, 95 e 165 m<sup>2</sup>.

A medição do apartamento foi feita ‘in loco’ manualmente utilizando-se trena e a pesagem dos móveis e equipamentos (como os eletrodomésticos), foi feita de acordo com a Figura 7.13. Na pesagem foram utilizadas 4 balanças tipo Baskara, cada balança com uma carga máxima de 130 quilos, Figura 7.14.



Figura 7.13 - Procedimento adotado para pesagem dos móveis.  
 (a) geladeira (b) fogão (c) microondas (d) mesa de centro.

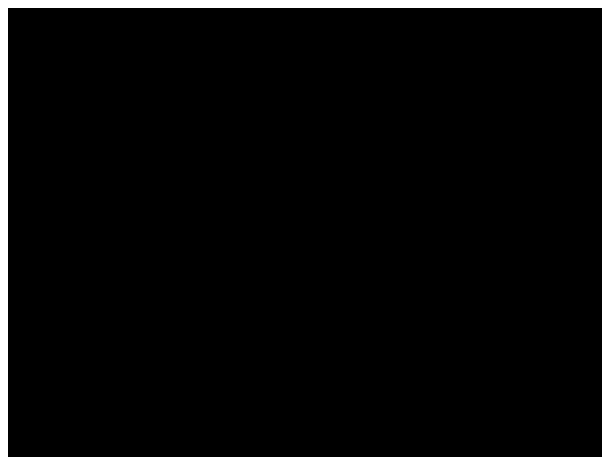


Figura 7.14 - Balança Baskara, carga máxima 130 quilos.

A variável de sobrecarga “peso dos móveis” foi analisada mediante as seguintes condições: carga por área útil do ambiente, carga por área de ocupação dos móveis e a taxa de ocupação dos mesmos. A justificativa de tal procedimento reside no fato que o peso dos móveis está distribuído inicialmente em sua área de projeção (área útil ocupada) e em uma segunda aproximação, distribuída na área da laje, normalmente com dimensões próximas aos ambientes (compartimentos) dos apartamentos (sala, cozinha, etc.), por meio de sua taxa de ocupação.

### 7.5.1.1 Carga dos Móveis pela Área Útil do Ambiente

A carga dos móveis pela área útil do ambiente, conforme Tabela 7.5, pode ser determinada dividindo-se o peso total dos móveis pela área útil do ambiente, no qual o móvel está disposto. A análise desta variável foi feita para todos os ambientes (banheiros, cozinhas, salas, dormitórios e área de serviço) dos 74 apartamentos levantados nos 4 edifícios residenciais.

Tabela 7.5 - Resultados experimentais da carga dos móveis pela área útil do ambiente

Ambiente	N	Média (kN/m <sup>2</sup> )	Desvio -Padrão (kN/m <sup>2</sup> )	COV	F.D.P	Kolmogorov - Smirnov
Banheiro	103	0,15	0,09	0,6	weibull	0,01
Dormitório	102	0,29	0,09	0,31	normal	0,81
Sala	89	0,14	0,09	0,64	weibull	0,98
Cozinha	54	0,42	0,20	0,47	log-normal	0,02
Área de Serviço	38	0,17	0,18	1,05	log-normal	0,73

N= Número de Observações

F.D.P= Função densidade de probabilidade

Nos resultados obtidos através do levantamento do peso dos móveis de todos os ambientes têm-se média de 0,22 kN/m<sup>2</sup> e desvio - padrão de 0,15 kN/m<sup>2</sup>, a função que melhor se ajusta é a normal, conforme figuras 7.15 e 7.16.

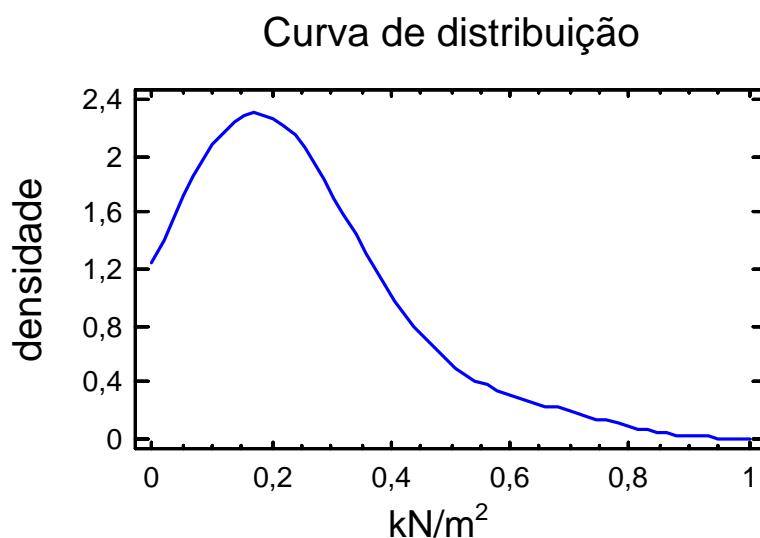


Figura 7.15 - Curva de distribuição dos dados de peso dos móveis.

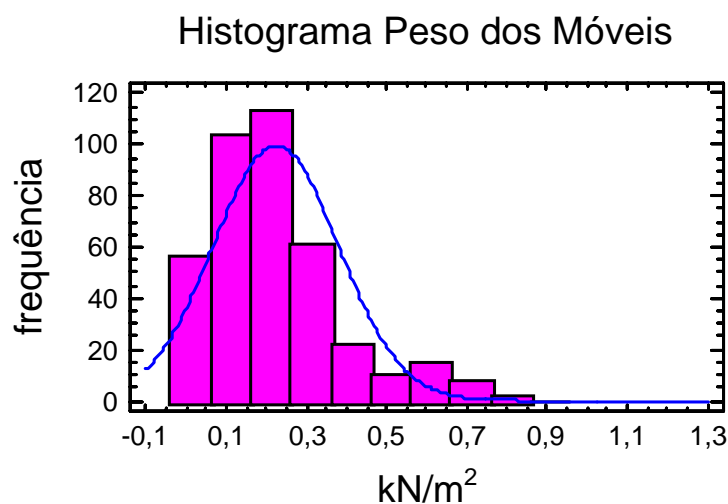


Figura 7.16 - Histograma do peso dos móveis com função normal ajustada.

#### 7.5.1.2 Carga por Área de Ocupação dos Móveis

A variável carga por área de ocupação dos móveis, de acordo com a Tabela 7.6, é determinada dividindo-se o peso dos móveis pela área que o mesmo ocupa no ambiente. Para esta verificação não foi considerado um peso constante para os móveis, e sim o peso referente ao seu uso, obtido através das medições realizadas no próprio ambiente.



Tabela 7.6 - Resultados experimentais da carga por área de ocupação dos móveis.

Ambiente	N	Média (kN/m <sup>2</sup> )	Desvio - Padrão (kN/m <sup>2</sup> )	COV	F.D.P	Kolmogorov - Smirnov
Banheiro	103	0,50	0,12	0,24	log -normal	0,01
Dormitório	102	0,53	0,12	0,22	normal	0,08
Sala	89	0,42	0,18	0,42	log- normal	0,63
Cozinha	54	0,74	0,10	0,13	weibull	0,38
Área de Serviço	38	1,18	0,37	0,31	log -normal	0,47

N= Número de Observações

F.D.P= Função densidade de probabilidade

### 7.5.1.3 Taxa de Ocupação dos Móveis

A taxa de ocupação dos móveis, conforme Tabela 7.7, é determinada através da relação entre a área ocupada pelos móveis e a área útil do ambiente. Esta análise foi feita para todos os ambientes de todos os apartamentos, apenas as áreas de corredor e circulação são consideradas nulas.

Tabela 7.7 - Resultados experimentais da taxa de ocupação dos móveis.

Ambiente	N	Média %	Desvio - Padrão %	COV	F.D.P	Kolmogorov - Smirnov
Banheiro	103	28,86	14,43	0,50	weibull	0,18
Dormitório	102	55,43	17,07	0,30	weibull	0,91
Sala	89	37,36	18,14	0,48	weibull	0,99
Cozinha	54	57,27	27,41	0,47	normal	0,13
Área de Serviço	38	17,75	22,01	1,24	weibull	0,13

N= Número de Observações

F.D.P= Função densidade de probabilidade

### 7.5.2 PESO DAS PESSOAS

A obtenção dos dados para caracterizar a variável “peso das pessoas”, foi realizada através de entrevistas com os moradores dos apartamentos onde foi feita a pesagem dos móveis, pertencente a variável de sobrecarga.

Através destes estudos obteve-se um total de 142 pessoas moradoras dos edifícios estudados e mais entrevista com 121 pessoas que não se encontravam residentes nestes

apartamentos, caracterizando os dados complementares, assim através de todos estes dados foi feita uma análise estatística, conforme Tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Resultados experimentais do peso das pessoas.

Local	N	Média kN	Desvio - Padrão kN	COV	F.D.P	Kolmogorov - Smirnov
Edifício 1	47	0,76	0,15	0,19	log-normal	0,09
Edifício 2	35	0,74	0,11	0,14	log-normal	0,05
Edifício 3	28	0,73	0,12	0,16	log-normal	0,02
Edifício 4	32	0,71	0,13	0,18	log-normal	0,019
Total 4 edifícios	142	0,74	0,13	0,17	normal	0,00003
Dados complementares	121	0,68	0,24	0,35	normal	0,56
Total de edifícios + dados complementares	263	0,71	0,19	0,26	weibull	0,0001

N= Número de Pessoas

F.D.P= Função densidade de probabilidade

Verifica-se que a média obtida para os quatro edifícios foi próxima, assim com o coeficiente de variação. Os dados obtidos aleatoriamente apresentaram uma variabilidade muito superior aos dados exclusivos dos edifícios. Desta análise pode-se concluir que os resultados obtidos para levantamentos gerais realizados pelos órgãos governamentais podem não representar a situação de carga de um edifício em particular.

As Figuras 7.17, 7.18, 7.19 e 7.20 representam a curva de distribuição e a função melhor ajustada para os 4 edifícios estudados e os dados complementares obtidos de pessoas não residentes nestes edifícios.

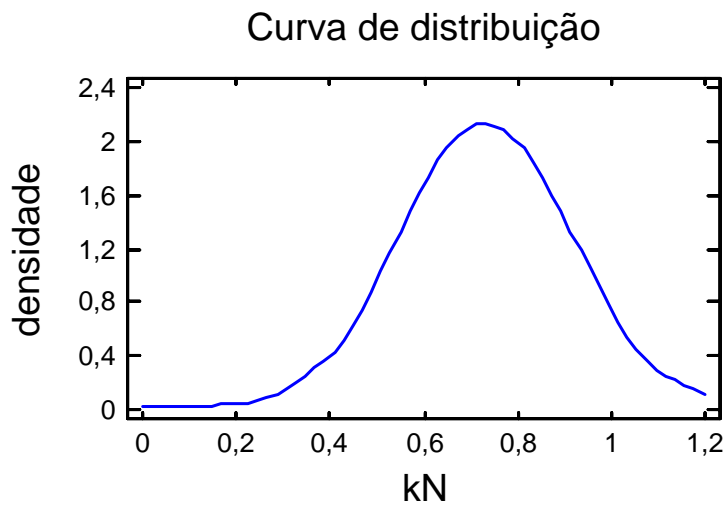


Figura 7.17 - Curva de distribuição dos dados de peso das pessoas dos 4 edifícios.

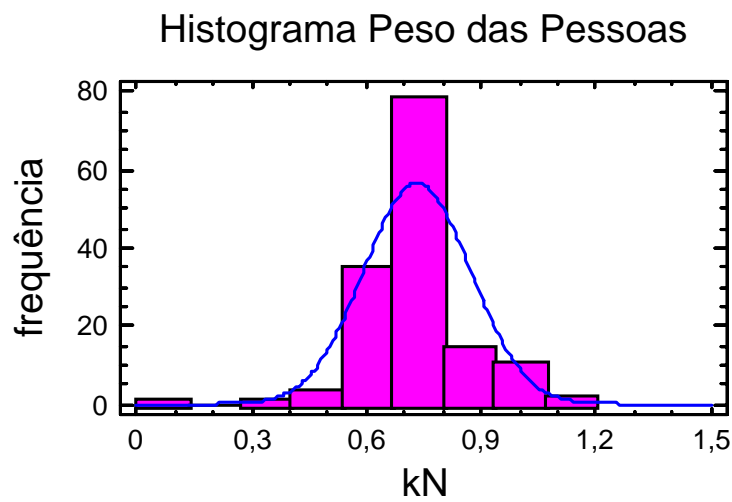


Figura 7.18 - Histograma do peso das pessoas dos 4 edifícios com função normal ajustada

Pelos gráficos das Figuras 7.18 e 7.19, verifica-se a existência de uma distribuição mais gradativa de valores superiores a média, mas que é compensada pelos valores acumulados quando analisados todos os dados.

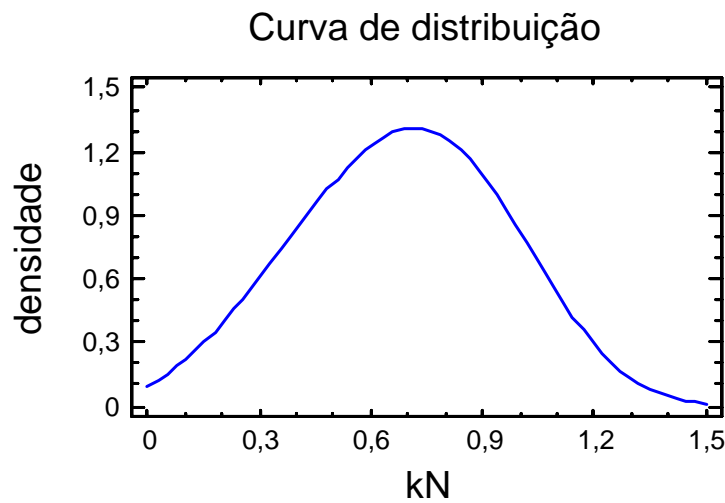


Figura 7.19 - Curva de distribuição dos dados complementares para o peso das pessoas.

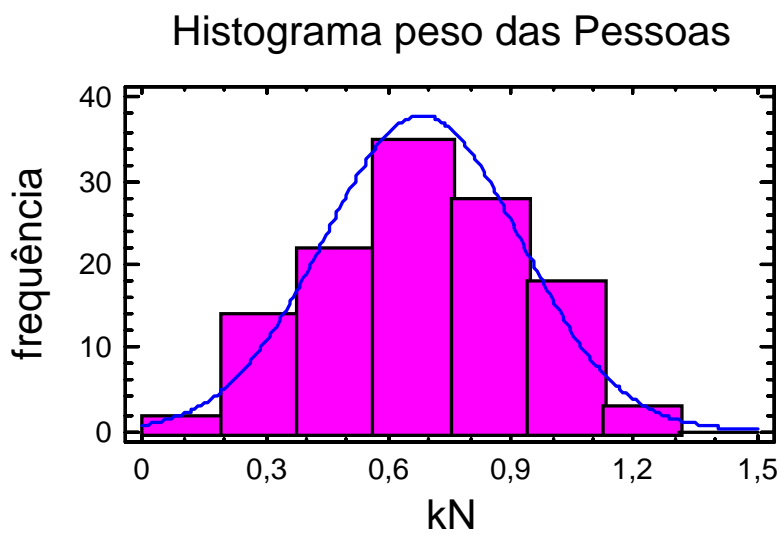


Figura 7.20 - Histograma dos dados complementares de peso de pessoas com função normal ajustada.

A média obtida quando se considera o peso das pessoas por edifício, em todos os edifícios e os obtidos das pessoas residentes e não residentes dos edifícios, tem um valor muito próximo dos valores encontrados por outros pesquisadores, como Páez (1982) e Da Silva (1998).

### 7.5.3 COMPARAÇÃO DAS CARGAS VERTICAIS OBTIDAS COM OS VALORES DA NBR-6120

O trabalho desenvolvido visou a caracterização das variáveis para aplicação em avaliação estrutural ou estimativa da vida útil, entretanto, pode-se realizar uma simples comparação com os valores normativos, embora sejam estes para projeto.

Um dos problemas que surge após a caracterização das variáveis básicas de definição da sobrecarga é a combinação destas cargas para gerar a carga uniformemente distribuída a ser utilizada. Neste aspecto e como forma de verificar como estão os valores obtidos em relação aos valores normativos, será considerado o quantil de 5% para a determinação dos valores a serem utilizados na combinação das cargas e, de forma simplificada, uma função de distribuição normal para as três variáveis. Assim, o valor será obtido pela média somada a 1,645 vezes o desvio padrão.

Aplicando o disposto anteriormente, obtêm-se os seguintes valores:

- peso dos móveis =  $0,22 + 1,645 \times 0,15 = 0,47 \text{ kN/m}^2$
- peso das pessoas =  $0,74 + 1,645 \times 0,13 = 0,95 \text{ kN}$

Considerando a área de ocupação de uma pessoa de  $0,5 \text{ m}^2$ , resulta para peso das pessoas por área de  $1,9 \text{ kN/m}^2$ .

Existem vários estudos de combinação de sobrecargas, porém será utilizada como exemplo, a expressão proposta por Da Silva (1998), expressa pela Equação 7.1.

$$SC = M \times tm + P \times (1 - tm) \quad \text{Equação 7.1}$$

Onde:

- SC - Sobrecarga
- M - Peso dos móveis =  $0,47 \text{ kN/m}^2$
- P - Peso das pessoas =  $1,90 \text{ kN/m}^2$
- tm - Taxa de ocupação dos móveis

Utilizando-se os valores encontrados e a média para a taxa de ocupação de 44,73%, a sobrecarga será de 1,26 kN/m<sup>2</sup>. Este valor pode ser considerado extremo e com probabilidades similares as da norma NBR 6120 (ABNT, 2003) que, para os ambientes citados dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro é preconizado de 1,5 kN/m<sup>2</sup>.

Considerando que os valores assumidos podem ser distintos dos recomendados pela norma, pode-se considerar que os valores previstos na norma para projeto seguem atendendo as situações na atualidade, entretanto, os valores assumidos neste cálculo devem ser estudados.

# CAPÍTULO 8

## CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 8.1 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho consiste na caracterização de variáveis que influenciam na vida útil das estruturas de concreto, tais como: variáveis ambientais (temperatura, umidade relativa e concentração de CO<sub>2</sub>) e as variáveis de sobrecarga (peso dos móveis e das pessoas).

Após a realização deste trabalho, torna-se notório a escassez de publicações e referências bibliográficas com informações relevantes e concisas em relação ao tema abordado, ou seja, de caracterização de variáveis de sobrecarga e ambientais. Tem-se dado maior ênfase aos métodos e processos matemáticos a serem aplicados na estimativa de vida útil.

Durante a realização do trabalho destaca-se a importância que os órgãos competentes como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB entre outros, vêm demonstrando em relação as variáveis que influenciam na vida útil das estruturas de concreto.

O interesse demonstrado por estes órgãos pode ser comprovado através do número de seminários que permite um estudo mais eficaz na definição probabilística das variáveis e de que forma estas variáveis influenciam na vida útil das estruturas de concreto.

A partir da análise dos dados compilados e da revisão bibliográfica feita relativa aos parâmetros ambientais, pode-se concluir:

- A variável temperatura sofre uma variação nos parâmetros de definição de uma região para outra, o que mostra, por sua vez, a necessidade de caracterização desta variável no micro e macro clima, sendo esta variável uma grande influenciadora no processo de deterioração e conseqüentemente na vida útil das estruturas. Para a cidade de Uberlândia, o valor obtido para a média da variável temperatura foi de 22,8°C com um desvio padrão de 4,41°C, resultando em um coeficiente de variação 19%, e uma função densidade de probabilidade normal, para o período de 1998 a 2005.

- Como foi para a variável temperatura, para a variável umidade relativa o processo de caracterização também é importante numa escala regional, pois os estudos mostram a ocorrência de variação de região para região. A função densidade de probabilidade normal, quando ajustada aos dados de um ano, pode resultar distinta para dados de períodos maiores.

- No estudo de umidade relativa realizado para a cidade de Uberlândia, a média encontrada para o período de 1998 a 2005 foi de 65,06%, com desvio padrão de 17,15% e uma função densidade de probabilidade normal. O coeficiente de variação encontrado de 26% para a cidade de Uberlândia - MG é um valor elevado, mas já era esperado para esta variável e segue a mesma tendência dos valores obtidos por outros pesquisadores.

- A média de concentração de CO<sub>2</sub>, a nível mundial tem aumentado, podendo-se considerar para o estudo da vida útil uma expressão que contemple uma taxa de crescimento anual de 1,4 ppm. Assim, pode-se manter o coeficiente de variação e alterar a média em função do tempo.



- Para grandes centros urbanos como a cidade de São Paulo a média dos valores de concentração de CO<sub>2</sub> dos últimos anos (1997 a 2005), pode ser estimada em 1083 ppm, com um desvio padrão de 168 ppm e uma função densidade de probabilidade log - normal. O coeficiente de variação obtido de 15 % poderá ser adotado para outras localidades nas quais não sejam efetuadas medições de concentração.

- Para a variável de sobrecarga “peso dos móveis” obteve-se uma média de 0,22 kN/m<sup>2</sup> para todos os ambientes e o desvio padrão de 0,15 kN/m<sup>2</sup> e pode-se adotar uma função densidade de probabilidade normal, o que confirmou um estudo realizado por Páez (1982), que encontrou uma média de 0,24 kN/m<sup>2</sup> para todos os ambientes.

- Considerando a variável de sobrecarga “peso das pessoas” o valor encontrado da média foi de 0,74 kN por pessoa com um desvio padrão de 0,13 kN, o que vem confirmar os valores já encontrados por outros pesquisadores como Páez (1982) e Da Silva (1998).

- Por fim, ao realizar o levantamento, compilação e análise de todos os dados estudados, pode-se concluir que as funções densidade de probabilidade encontradas neste trabalho, serão importantes para os estudos referentes as técnicas de confiabilidade estrutural, bem como servir de referência para outros investigadores no que abrange estas variáveis no estudo da vida útil das estruturas de concreto.

## **8.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

De acordo com o tempo que se dispõe para o desenvolvimento deste trabalho, e com a utilização de uma metodologia que requer muito tempo, pois para a execução de levantamentos manuais de medição de apartamentos desde sua planta e pesagem de todo seu mobiliário e usuários, faz com que alguns fatores observados ao longo da pesquisa não possam fazer parte do trabalho, por isso, todos esses fatores citados na conclusão poderão desencadear futuros trabalhos.

### **8.2.1 VARIÁVEIS AMBIENTAIS**

#### **· CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub>**

- Estudo e monitoramento da concentração de CO<sub>2</sub> para diversas regiões, viabilizando um estudo probabilístico e uma comparação entre os dados levantados.
- Analisar o mecanismo de transformação de CO (monóxido de carbono) em CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) para possibilitar a determinação em regiões sem controle direto do CO<sub>2</sub>.
- Analisar a diferença de concentração de CO<sub>2</sub> em ambientes interiores (micro clima) e compará-los com as medições exteriores de estações (macro clima).

#### **· TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA**

- Realizar levantamento de dados em cidades de regiões pertencentes ao macro e ao micro clima, podendo-se fazer uma análise da variação da temperatura e umidade relativa em diferentes locais.
- Realizar uma coleta exaustiva de dados de forma abrangente para a elaboração de mapas de isotérmicas e de umidade relativa para micro regiões.

### **8.2.2 VARIÁVEIS DE SOBRECARGA**

#### **· PESO DOS MÓVEIS**

- É necessário o estudo de edifícios de acordo com sua área, padrão da construção, localização e renda do usuário, viabilizando uma comparação entre os vários tipos de usuários e a quantidade de móveis utilizada pelo mesmo.

- Continuar levantando dados em relação a variável de sobrecarga peso dos móveis diversificando o usuário.
  
- Desenvolver outros modelos para combinação das cargas para obtenção da sobrecarga.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos**. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE PERDRIX, M. DEL C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Ed.Pini, 1992. 104p.

ANDRADE, T.; DA COSTA E SILVA, A.J. **Patologia das Estruturas**. In: ISAIA, G.C. (Ed). **Concreto: ensaio, pesquisa e realizações**. 2v, São Paulo: IBRACON, 2005.

ANG, A. H. S.; TANG, W. H. **Probability Concepts in Engineering Planning and Design**. Vol. I & II, John Wiley, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 6120: **Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

\_\_\_\_\_. NBR 8681: **Ações e Segurança nas Estruturas**. Rio de Janeiro, 2003.

ASTM E 632-82 – **Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials** – Committee G3. Annual Book of ASTM Standards, v. 14, 1988.

BAKKER, R. F. M. Initiation Period. Report of the Tech. Comm. 60-CSC RILEM – **Corrosion of Steel in Concrete**. Ed. P. Schiessl, London, 1988.

BENTZ, E. C. **Probabilistic Modeling of Service Life for Structures Subjected to Chlorides**. ACI Materials Journal, v. 100, n° 5, 2003.

BOB, C.; BOB, L. **On The Service Life of Concrete Structures**. Proceeding International Conference on Diagnosis of Concrete Structures, RILEM, Republica Eslovaca, 1991.

CCE. Comisión de las Comunidades Europeas. **El Estado del medio ambiente en la comunidad europea-Una idea general**. V.III, 1992.

CETESB - **Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/relatórios>>. Acesso em: 26 de julho 2006.

CLIFTON, J. R. **Predicting the remaining service life of concrete**. National Institute of Standard and Technology, Report N° 4712 NISTIR, Gaithersburg, EUA., 1991.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB Bulletin d'Information n° 238; **New Approach to Durability Design – An Example for Carbonation Induced Corrosion**. 1997.

\_\_\_\_\_. **CEB-FIP Model Code 1990**. London: Thomas Telford, 1993.

COROTIS, R. B.; DOSHI, V. A. Probability models for live-load survey results. **Journal of the Structural Division-ASCE**, Madison Wisc. Vol.103, n° ST6, June , 1977.

DA SILVA, T. J. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. Tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1998.

FAGERLUND, G. **Predicting the service life of concrete structures**. Stockholm, 1983.

FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da Carbonatação em Estruturas de Concreto Armado em Brasília – Avaliação de Pilares**. Tese de Doutorado,, UNB, Brasília, DF, 2004.

GALAMBOS, T. V.; ELLINGWOOD, B.; MACGREGOR, J. G.; CORNELL, C. A. Probability based load criteria: assessment of current design practice. **Journal of the Structural Division-ASCE**, Vol. 108, nº ST5, 1982.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1996.

GOMES, H. M. **Análise da Confiabilidade de Estruturas de Concreto Armado usando o Método de Elementos Finitos e os Processos de Simulação**. Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre, 1997.

\_\_\_\_\_. **Técnicas de Avaliação da Confiabilidade em Estruturas de Concreto Armado**. Tese de Doutorado, Porto Alegre, UFRGS, 2001.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. Tese de Livre Docência, EPUSP, São Paulo, 1993.

\_\_\_\_\_. **Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. *Anais*. Porto Alegre, 1997. v.1. p. 1-30.

HOFFMANN, A. T. **Influência da Adição de Sílica Ativa, da Relação Água/Aglomerante, Temperatura e Tempo de Cura no Coeficiente de Difusão de Cloretos em Concretos**.. Dissertação de Mestrado, UFRGS. Porto Alegre, 2001.

HUSSAIN, S.; AL-MUSALLAM, A.; AL-GAHTANI, A. Factors Affecting Threshold Chloride for Reinforcement Corrosion in Concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n° 7, 1995.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br-brasil\\_em\\_sintese-tabelas](http://www.ibge.gov.br-brasil_em_sintese-tabelas)>. Acesso em: 28 agosto 2005.

INMET - **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>> Acesso em: 28 julho 2006.

KRAKOVSKI, M. Monte Carlo Simulation of the Acceptance Control of Concrete. *Structural Safety*, n° 17, 1995.

KROPP, J.; HILSDORF, H.K.; GRUBE, H.; ANDRADE, C.; NILSSON, L. O. **Transports Mechanisms and Definitions**. RILEM, Technical Committee 116-PCD – Performance Criteria for Concrete Durability, 1995.

LARANJA, R. C; BRITO, J. Reinforced concrete structures safety assessment: dead and live loads quantification. **National Meeting of Conservation and Rehabilitation of Structures**, Lisbon, p. 611-620, 2000.

MANUGISTICS, Inc. **Programa Statgraphics Plus 5.1 Educational**, registrado por Statistical Graphics Corporation, USA, 2000

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1 ed. São Paulo. Ed. Pini, 1994.

MELCHERS, R. E. **Structural reliability: analysis e prediction**. Chichester: Ed. Ellis Horwood. 1987.

MORINAGA, S. **Prediction of Service Lives of Reinforced Concrete Buildings Based on the Corrosion Rate of Reinforcing Steel**. Proceedings 5th International Conference – Durability of Building Materials and Components, Brighton, 1990.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <<http://www.nasa.gov>. > Acesso em: 29 julho 2006.

NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de los Morteros de Reparación Frente a la Carbo natación y a la Penetración de Cloruros en Estructuras de Hormigón Armado Dañadas por Corrosión de Armaduras - Estudio Mediante la tecnica de Resistencia de Polarizacion**. Tesis Doctoral, Madrid, Universidad Politecnica de Madrid, 1992.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo, PINI, 1997.

OECD- Organisation for economic Co-operation and Development. Environmental Data Compendium, 1995.

PÁEZ, A. **Teoría de la seguridad**. Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1982. 85 p.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. **Effect of Composition, Environmental Factors and Cement-Lime Mortar Coating on Concrete Carbonation**. *Materials and Structures*, v. 25, 1992.

PARROTT, L. J. **A Review of Carbonation in Reinforced Concrete**. Cement and Concrete Association, Report C/1-0987, July, 1987.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação dos Coeficientes de Difusão de Cloretos em Concretos: Influência do Tipo de Cimento, da Relação a/c da Temperatura e do Tempo de Cura**. Dissertação de Mestrado, UFRGS. Porto Alegre, 2001.

SÁNCHEZ FILHO, E. S. **Nova normalização brasileira para o concreto estrutural**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 1999.p.71-101.

SCHIESSL, P. **Corrosion of Reinforcement. Report of International Workshop on Durability of Concrete Structures**, CEB-RILEM, Dinamarca, 1983.



SIEMES, T. Durability - A Probabilistic Approach. **Durability of Building Materials**, nº 3, 1985.

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. 1 ed., São Paulo: Ed. Pini, 1995. 152 p.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Ed. Pini, 1998. 225 p.

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.

VAN DER TOORN, A. **The Maintenance of Civil Engineering Structures**. *Heron*. v. 39, nº 4, 1992.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)