



**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ**

**VICENTE MARCONCIN VANHAZEBROUCK**

**ANÁLISE DE DUTOS CORROÍDOS POR MEIO DE  
MÉTODO DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL**

**CURITIBA  
2008**

**VICENTE MARCONCIN VANHAZEBROUCK**

**ANÁLISE DE DUTOS CORROÍDOS POR MEIO DE  
MÉTODO DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.**

**Orientador: Prof. Roberto Dalledone Machado, Dr.**

**CURITIBA  
2008**

# **TERMO DE APROVAÇÃO**

**VICENTE MARCONCIN VANHAZEBROUCK**

## **ANÁLISE DE DUTOS CORROÍDOS POR MEIO DE MÉTODOS DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.**

### **COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Roberto Dalledone Machado, Dr.  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná**

---

**Prof. João Elias Abdalla Filho, Ph.D.  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná**

---

**Prof. Anselmo Chaves Neto, Dr.  
Universidade Federal do Paraná**

**Curitiba, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2008.**

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha esposa Vanessa por todo apoio e incentivo durante o desenvolvimento deste mestrado. Sem seu amor e compreensão nada disso seria possível.

À minha mãe Maria Amélia e ao meu pai Roberto pelo apoio e amor durante toda a minha vida.

Ao meu avô paterno August Jacques pelo exemplo e pela transmissão de experiências de vida.

Ao professor Roberto Dalledone Machado pelas orientações, atenção dispensada, paciência e pelos conhecimentos transmitidos durante o curso de mestrado.

Aos professores do curso de mestrado pelo fornecimento de bases sólidas aproveitadas no desenvolvimento desta dissertação.

*"Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós." (Antoine de Saint-Exupéry)*

# RESUMO

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um procedimento para a análise de confiabilidade estrutural de dutos pressurizados com defeitos causados por corrosão. Desta forma, pode ser calculado o índice de confiabilidade e conseqüentemente a probabilidade de falha do duto, levando-se em consideração diversos parâmetros, tais como profundidade do defeito, diâmetro da tubulação, comprimento do defeito, pressão do fluido, tensão de escoamento do material do duto, tensão última do material do duto e espessura da parede da tubulação. Estas variáveis são aleatórias e podem ser representadas por funções densidade de probabilidade normal e log-normal. Para estimar o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha do duto com defeitos, utiliza-se o método iterativo de primeira ordem e segundo momento, denominado FORM (*“First Order Reliability Method”*). A função de falha é definida em termos da pressão interna aplicada, ou seja, pressão do fluido e da pressão de falha do duto. Portanto para o desenvolvimento do trabalho será implementado um programa em ambiente Matlab visando aplicar o método analítico FORM em exemplos típicos. Em seguida é realizada uma análise comparativa entre os métodos empíricos em termos de função de falha e índice de confiabilidade

***Palavras-Chave:*** Confiabilidade estrutural, Dutos, Corrosão, FORM.

# ABSTRACT

The purpose of present work is to develop a procedure for the analysis of structural reliability of pressurized pipelines with defects caused by corrosion. Under this, can be calculated the reliability index and consequently the probability of failure of the pipeline, taking into consideration various factors such as defect depth, pipe diameter, defect length, fluid pressure, yield strength of the pipeline material, ultimate strength of the pipeline material and pipeline wall thickness. These variables are random and can be represented by probability density functions of normal and log-normal. To estimate the reliability index and the probability of failure of the pipeline with defects, using the iterative method of the first order and second moment, called FORM ("First Order Reliability Method"). The function of failure is defined in terms of internal pressure applied, i.e. the fluid pressure and the pressure of failure of the pipeline. So for the development of a work program will be implemented in Matlab environment aimed at applying the method FORM in typical examples. Then is performed a comparative analysis between the empirical methods in terms of failure function and reliability index.

***Keywords:*** *Structural Reliability, Pipeline, Corrosion, FORM.*

# LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Oleoduto rompido. ....	21
<b>Figura 2.1</b> – Célula de corrosão básica.....	27
<b>Figura 2.2</b> – Múltiplas células de corrosão ao longo de tubulação enterrada.....	27
<b>Figura 2.3</b> – Formas de Corrosão. ....	28
<b>Figura 2.4</b> – Pig de corrosão.....	31
<b>Figura 2.5</b> – Pig de corrosão sendo inserido em um duto. ....	31
<b>Figura 2.6</b> – Inspetor externo de dutos (IED).....	32
<b>Figura 2.7</b> – (a) Dutovia com dutos aparentes. Fonte: Startrak (2006), (b) Dutovia com dutos subterrâneos. Fonte: Cesec (2006), .....	33
<b>Figura 3.1</b> - Equilíbrio axial. ....	40
<b>Figura 3.2</b> - Equilíbrio circunferencial. ....	40
<b>Figura 3.3</b> - Tensões axiais e circunferenciais.....	41
<b>Figura 3.4</b> – Aproximação dimensional dos defeitos de corrosão .....	43
<b>Figura 3.5</b> - Geometria dos dutos com defeitos de corrosão .....	43
<b>Figura 3.6</b> – Preparação do duto e equipamentos utilizados para <i>Burst test</i> . ....	50
<b>Figura 3.7</b> - <i>Burst test</i> de duto com defeito de corrosão longo.....	50
<b>Figura 3.8</b> - Detalhe de duto com defeito de corrosão longo após a ruptura.....	50
<b>Figura 3.9</b> – Condições de contorno e resultados de análise de elementos finitos.....	52
<b>Figura 3.10</b> – (a) – corrosão retangular; (b) – corrosão semi-elíptica.....	54
<b>Figura 3.11</b> – Comparação de $P_{RUP}$ entre ensaios experimentais e AEF para elementos elípticos.....	55
<b>Figura 3.12</b> – Comparação de $P_{máx}$ segundo os métodos B31G modificado, PCORRC, DNV e AEF ( $R/t = 21,3$ ).....	56
<b>Figura 3.13</b> – Comparação de $P_{máx}$ segundo os métodos B31G modificado, PCORRC, DNV e AEF ( $R/t = 30$ ).....	57
<b>Figura 4.1</b> - função densidade de probabilidade (f.d.p.).....	61
<b>Figura 4.2</b> - função de distribuição acumulada (f.d.a.).....	61
<b>Figura 4.3</b> - $f(x)$ – f.d.p. normal e $F(x)$ – f.d.a. normal.....	64
<b>Figura 4.4:</b> funções de densidade de probabilidade normais para quatro diferentes conjuntos de parâmetros.....	64
<b>Figura 4.5</b> - f.d.p. Log-normal para média nula e diferentes valores de desvio padrão .....	66



<b>Figura 4.6</b> - f.d.a. Log-normal para média nula e diferentes valores de desvio padrão .....	66
<b>Figura 4.7</b> – Definição da função de falha .....	67
<b>Figura 4.8</b> – Definição do índice de confiabilidade. ....	69
<b>Figura 5.1</b> – Exemplo de resultados de uma simulações de Monte Carlo.....	73
<b>Figura 5.2</b> – Função de falha pelos métodos FORM e SORM.....	74
<b>Figura 6.1</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição.....	88
<b>Figura 6.2</b> – Probabilidade de falha <i>versus</i> período de exposição .....	88
<b>Figura 6.3</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória profundidade inicial do defeito ( $d_0$ ) .	92
<b>Figura 6.4</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória diametro do duto (D).....	93
<b>Figura 6.5</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória comprimento inicial do defeito ( $a_0$ ) .	93
<b>Figura 6.6</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória pressão do fluido ( $P_a$ ) .....	94
<b>Figura 6.7</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória tensão de escoamento do material do duto ( $\sigma_y$ ).....	94
<b>Figura 6.8</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória espessura da parede do duto (t).....	95
<b>Figura 6.9</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória taxa de corrosão radial ( $R_d$ ).....	95
<b>Figura 6.10</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória taxa de corrosão longitudinal ( $R_a$ )....	96
<b>Figura 6.11</b> – Pressão de falha <i>versus</i> período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos.....	97
<b>Figura 6.12</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos. ....	98
<b>Figura 6.13</b> – Probabilidade de falha <i>versus</i> período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos. ....	98
<b>Figura 6.14</b> – Pressão de falha <i>versus</i> período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios.....	99
<b>Figura 6.15</b> – Índice de confiabilidade <i>versus</i> período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios. ....	100

<b>Figura 6.16</b> – Probabilidade de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios.....	100
<b>Figura 6.17</b> – Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos.....	101
<b>Figura 6.18</b> – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos. ....	102
<b>Figura 6.19</b> – Probabilidade de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos. ....	102
<b>Figura 6.20</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	104
<b>Figura 6.21</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	105
<b>Figura 6.22</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	105
<b>Figura 6.23</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	106
<b>Figura 6.24</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	106
<b>Figura 6.25</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	109
<b>Figura 6.26</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	110
<b>Figura 6.27</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	110

<b>Figura 6.28</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	111
<b>Figura 6.29</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	111
<b>Figura 6.30</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	112
<b>Figura 6.31</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	112
<b>Figura 6.32</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	113
<b>Figura 6.33</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	114
<b>Figura 6.34</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	115
<b>Figura 6.35</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	115
<b>Figura 6.36</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	116
<b>Figura 6.37</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	116
<b>Figura 6.38</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	117

<b>Figura 6.39</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	117
<b>Figura 6.40</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	118
<b>Figura 6.41</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	120
<b>Figura 6.42</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	120
<b>Figura 6.43</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	121
<b>Figura 6.44</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	121
<b>Figura 6.45</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	122
<b>Figura 6.46</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	122
<b>Figura 6.47</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	123
<b>Figura 6.48</b> – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos .....	123
<b>Figura 6.49</b> - Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini. ....	124

**Figura 6.50** – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini. 125

**Figura 6.51** - Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini. .... 126

**Figura 6.52** – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini. .... 127

**Figura 6.53** - Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini. .... 128

**Figura 6.54** – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini. 129

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> - Requisitos de resistência à tração para os aços PSL 2.....	34
<b>Tabela 3.1.</b> - Espécimes ensaiados por Choi <i>et al.</i> (2003).....	51
<b>Tabela 3.2</b> – Resultados das análises numéricas de Choi et al. (2003) .....	53
<b>Tabela 3.3</b> – Matriz das análises realizadas por Choi et al., totalizando 30 casos analisados.	57
<b>Tabela 6.1</b> – Variáveis aleatórias e seus parâmetros usados no exemplo de duto com corrosão .....	87
<b>Tabela 6.2</b> – Dados apresentados por Ahammed (1998) e no presente trabalho referentes ao índice de confiabilidade e probabilidade de falha. ....	89
<b>Tabela 6.3</b> – Cálculo do fator de importância de cada uma das variáveis dependente do tempo de exposição .....	90
<b>Tabela 6.4</b> – Dados apresentados por Ahammed (1998) referentes ao fator de importância para diferentes tempos de exposição. Fonte: Ahammed (1998).....	90
<b>Tabela 6.5</b> – Diferença percentual em módulo entre os resultados apresentados por Ahammed (1998) e os resultados apresentados no presente trabalho. ....	91
<b>Tabela 6.6</b> – Características dos espécimes descritos por Choi (2003).....	104
<b>Tabela 6.7</b> – Dados de pressão de falha utilizados para o cálculo da incerteza de modelagem. .....	108
<b>Tabela 6.8</b> – Incerteza de modelagem para cada um dos métodos.....	109
<b>Tabela 6.9</b> – Constantes para o cálculo da incerteza de modelagem com base nos dados de Choi(2003).....	114
<b>Tabela 6.10</b> – Característica dos espécimes descritos por Valentini (2006). ....	119
<b>Tabela 6.11</b> – Dados de pressão de falha utilizados para o cálculo da incerteza de modelagem .....	119
<b>Tabela 6.12</b> – Constantes para o cálculo da incerteza de modelagem com base nos dados de Valentini(2006).....	119

# LISTA DE SÍMBOLOS

$E$	módulo de elasticidade longitudinal;
$\nu$	coeficiente de Poisson;
$D$	diâmetro externo do duto;
$R$	raio externo do duto;
$L$	comprimento do duto;
$t$	espessura da parede do duto;
$a$	comprimento da corrosão;
$c$	largura da corrosão;
$d$	profundidade da corrosão;
$P_0$	pressão de falha para o duto de parede fina sem corrosão;
$\alpha$	fator empírico que leva em conta a geometria do defeito de corrosão;
$A$	área longitudinal de perda de metal devido à corrosão;
$A_0$	área longitudinal do duto sem corrosão;
$M$	fator de dilatação de Folias;
$F_d$	fator de segurança de projeto;
$F_m$	fator de modelagem;
$A_r$	fator de redução da área circunferencial;
$\{u\}$	vetor de deslocamentos nodais;
$\epsilon$	deformação total;
$\sigma_{flow}$	tensão de fluência no material do duto;
$\sigma_{rup}$	tensão de ruptura do material do duto;
$\sigma_Y$	tensão de escoamento do material do duto;
$\sigma_u$	tensão de última do material do duto;
$\sigma_{circ}$	tensão circunferencial do duto;
$\alpha$	fator empírico;
$f_r$	fator de redução;
$A$	área longitudinal de perda de metal devido à corrosão;
$A_0$	área longitudinal do duto sem corrosão;

$M$	fator de dilatação de Folias, é adimensional e leva em conta o comprimento da corrosão;
$P_a$	pressão aplicada pelo fluido no duto
$P_f$	pressão interna atuante no duto para ruptura do material.
$P_0$	pressão de falha para o duto de parede fina sem corrosão;
$d_0$	profundidade do defeito no tempo $T_0$
$a_0$	comprimento do defeito no tempo $T_0$
$T_0$	tempo da última inspeção do duto
f.d.p.	função densidade de probabilidade
f.d.a.	função distribuição acumulada
FORM	<i>First Order Reliability Method</i>
SORM	<i>Second Order Reliability Method.</i>
$\sigma$	desvio padrão das respectivas variáveis
VAR	variância
CV	coeficiente de variação
$\mu$	média das respectivas variáveis
$\Omega_F$	domínio de falha
$I(U)$	estimador de falha
$n_s$	numero de simulações
$\lambda$	média da f.d.p. lognormal
$\xi$	desvio padrão da f.d.p. lognormal
$R$	variável aleatória resistência
$S$	variável aleatória solicitação
$G(U)$	função de falha da variável aleatória $U$
$\nabla G(U)$	gradiente da função de falha da variável aleatória $U$
$Pr_f$	probabilidade de falha
$\Phi (-)$	distribuição normal padronizada
$\beta$	índice de confiabilidade
$R_d$	taxa de corrosão radial
$R_a$	taxa de corrosão longitudinal
$U$	variável aleatória com f.d.p. qualquer
$V$	variável aleatória com f.d.p. normal estatisticamente independente
$V^{K+1}$	novo ponto de projeto



<b>J</b>	matriz Jacobiana
<b>TOL</b>	tolerância admitida
<b><math>U^{K+1}</math></b>	novo ponto de projeto no espaço original
<b>I</b>	fator de importância
<b>IM</b>	incerteza de modelagem

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Objetivos.....	22
1.2	Revisão Bibliográfica .....	23
2	CORROSÃO E OS DUTOS .....	26
2.1	Corrosão .....	26
2.1.1	Controle de Corrosão nos Dutos.....	28
2.1.1.1	Métodos de Controle de Corrosão.....	29
2.1.1.2	Métodos de Inspeção dos Dutos .....	30
2.2	Os Dutos .....	32
3	MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS DUTOS.....	35
3.1	Mecânica dos Sólidos .....	35
3.1.1	Equações Deformações-Deslocamentos.....	35
3.1.2	Equações Constitutivas.....	37
3.1.3	Tubo Cilíndrico de Parede Fina de Comprimento Infinito com Extremidades Fechadas Submetido à Pressão Interna.....	39
3.2	Métodos Analíticos Semi-Empíricos.....	41
3.2.1	Formulação Geral dos Métodos para Carregamento de Pressão Interna.....	44
3.2.1.1	Fatores de Segurança.....	46
3.2.2	Método B31G .....	46
3.2.3	Método <i>085dL</i> ou B31G Modificado .....	47
3.2.4	Método RPA ou <i>085dL</i> Modificado .....	47
3.2.5	Método DNV RP-F101.....	48
3.2.6	Método PCORRC ou Battelle .....	49
3.3	Métodos Experimentais .....	49
3.3.1	Ensaio Experimentais Realizados por Choi <i>et al.</i> (2003) .....	51
3.4	Métodos Numéricos.....	52
4	CONFIABILIDADE ESTRUTURAL .....	59
4.1	Variáveis aleatórias .....	60
4.2	Características de uma variável aleatória .....	62
4.3	Distribuições Usuais de Probabilidades .....	63
4.3.1	Distribuição Normal ou Gaussiana.....	63
4.3.2	Distribuição Normal Padronizada .....	65

4.3.3	Distribuição Log-normal .....	65
4.4	Confiabilidade de elementos estruturais.....	67
5	MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL .....	70
5.1	Métodos para a Avaliação da Probabilidade de Falha.....	71
5.1.1	Integração Numérica.....	71
5.1.2	Simulação de Monte Carlo .....	72
5.1.3	Métodos Analíticos FORM e SORM .....	74
5.1.3.1	FORM (First Order Reliability Method) .....	74
5.1.3.2	SORM (Second Order Reliability Method).....	75
5.1.4	Métodos Mistos ou Híbridos .....	75
5.2	Método Analítico FORM .....	75
5.2.1	Transformação de Variáveis.....	76
5.2.2	Determinação do Ponto de Projeto .....	79
5.2.3	Medidas de Sensibilidade .....	80
5.2.4	Algoritmo de análise de confiabilidade pelo método FORM.....	81
5.2.5	Fluxograma do algoritmo de análise de confiabilidade pelo método FORM...	82
6	APLICAÇÕES DO ALGORITMO FORM .....	84
6.1	Efeito da Corrosão no Duto ao Longo do Tempo .....	84
6.2	Estudo de caso .....	85
6.3	Comparação entre os métodos semi-empíricos .....	96
6.3.1	Defeitos Curtos .....	97
6.3.2	Defeitos Transitórios .....	99
6.3.3	Defeitos Longos.....	101
6.3.4	Espécimes de Choi (2003).....	103
6.3.4.1	Espécimes DB / CB / CC.....	104
6.3.4.2	Espécime DA.....	105
6.3.4.3	Espécime DC .....	105
6.3.4.4	Espécime LA .....	106
6.3.4.5	Espécime LC .....	106
6.4	Incerteza de Modelagem.....	107
6.4.1	Incerteza de modelagem constante baseada em Choi (2003) .....	108
6.4.1.1	Defeitos Curtos .....	109
6.4.1.2	Defeitos Transitórios .....	110
6.4.1.3	Defeitos Longos.....	110

6.4.1.4	Espécimes DB / CB / CC.....	111
6.4.1.5	Espécime DA.....	111
6.4.1.6	Espécime DC.....	112
6.4.1.7	Espécime LA.....	112
6.4.1.8	Espécime LC.....	113
6.4.2	Incerteza de modelagem em equação de regressão baseada nos resultados de Choi (2003).....	113
6.4.2.1	Defeitos Curtos.....	114
6.4.2.2	Defeitos Transitórios.....	115
6.4.2.3	Defeitos Longos.....	115
6.4.2.4	Espécimes DB / CB / CC.....	116
6.4.2.5	Espécime DA.....	116
6.4.2.6	Espécime DC.....	117
6.4.2.7	Espécime LA.....	117
6.4.2.8	Espécime LC.....	118
6.4.3	Incerteza de modelagem em equação de regressão baseada nos resultados de Valentini (2006).....	118
6.4.3.1	Defeitos Curtos.....	120
6.4.3.2	Defeitos Transitórios.....	120
6.4.3.3	Defeitos Longos.....	121
6.4.3.4	Espécimes DB / CB / CC.....	121
6.4.3.5	Espécime DA.....	122
6.4.3.6	Espécime DC.....	122
6.4.3.7	Espécime LA.....	123
6.4.3.8	Espécime LC.....	123
6.5	Comparativo de resultados devido a Incerteza de Modelagem.....	124
7	CONCLUSÃO.....	130
8	REFERÊNCIAS.....	134

# 1 INTRODUÇÃO

A expansão da malha nacional de transporte de meios fluidos faz com que aumente a utilização de dutos enterrados para o transporte de óleo e gás natural, uma vez que esse sistema é tido como meio eficiente, devido à sua segurança, facilidade e baixos custos relativos. A expansão deste sistema deve ser acompanhada de progressivas melhorias no projeto e nas técnicas de inspeção e manutenção das dutovias, tentando minimizar os danos e interrupções causados por defeitos quaisquer.

Um dos grandes problemas causadores de falhas nas redes dutoviárias é a corrosão, fenômeno que ataca indistintamente as estruturas e equipamentos metálicos. A seguir, com a finalidade de ilustrar o problema encontra-se a **figura 1.1** que mostra um oleoduto rompido devido a corrosão, em Campinas-SP.



Figura 1.1 – Oleoduto rompido.

Fonte: Cabral (2007)

Quando se constata a perda de resistência mecânica devido à corrosão, deve-se tomar a decisão se o duto pode continuar operando normalmente ou não, se é necessário reduzir a pressão de operação, ou ainda se deve ser realizado algum reparo no duto ou até substituí-lo.

Para a determinação da resistência mecânica residual de dutos pressurizados sujeitos a defeitos de corrosão frequentemente utilizam-se métodos determinísticos. Estes métodos estimam a severidade de cada defeito de corrosão individualmente utilizando valores nominais para a pressão de operação e para a pressão de ruptura do duto. Porém para a

determinação da pressão de ruptura do duto existem algumas incertezas envolvidas assim como a medição das dimensões do defeito (comprimento e profundidade), características geométricas do duto tais como diâmetro, espessura da parede além das características mecânicas como as tensões de escoamento e ruptura do material.

Entretanto, os métodos determinísticos não são capazes de estimar a probabilidade de falha do duto corroído com o tempo, devido a mudanças no carregamento e na pressão de ruptura durante a vida útil da tubulação.

Na última década a estimativa da probabilidade de falha de dutos corroídos vem sendo extensivamente utilizada. Porém, a abordagem probabilística vem sendo desenvolvida principalmente utilizando o método semi-empírico B31G modificado e o método de confiabilidade iterativa FORM.

## 1.1 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é desenvolver e aplicar um método de análise de dutos com defeitos causados por corrosão baseado nos conceitos de confiabilidade estrutural, com a utilização do método iterativo de primeira ordem e segundo momento, denominado FORM (*“First Order Reliability Method”*) para avaliar a resistência residual considerando as diversas incertezas inerentes a cada uma das variáveis aleatórias, tais como profundidade do defeito, diâmetro da tubulação, comprimento do defeito, pressão do fluido, tensão de escoamento do material do duto, tensão última do material do duto e espessura da parede da tubulação.

Para o desenvolvimento dessa metodologia de análise foram considerados defeitos de corrosão isolados, de forma retangular, com localização longitudinal, externa ou interna, estando esses defeitos afastados das regiões de solda. São consideradas as taxas de evolução da corrosão linear conforme descrito no item 6.1 do presente trabalho.

O método de análise desenvolvido foi programado em ambiente Matlab, com o objetivo de aplicá-lo em casos típicos da literatura embasados no método B31G modificado e em outros métodos analíticos semi-empíricos, com o intuito de realizar uma análise comparativa em termos de funções de falha e índices de confiabilidade.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

A avaliação da resistência residual de dutos corroídos é assunto amplamente estudado, e um método pioneiro que teve maior aplicação na avaliação de dutos com defeitos isolados, é o B31G da ASME (1991). Uma série extensiva de testes em dutos corroídos reais, que haviam sido tirados de serviço, foi realizada, submetendo-os a pressão interna até a ruptura. Com base nos resultados dos experimentos, expressões matemáticas para calcular a pressão máxima em dutos corroídos foram desenvolvidas. Essas expressões, embora semi-empíricas, basearam-se no princípio da mecânica da fratura. A partir dos ensaios realizados, um critério baseado apenas na geometria da corrosão foi desenvolvido para recusar dutos excessivamente corroídos.

Com o objetivo de obter uma solução para dutos corroídos mais específica em relação a materiais de alta resistência e diferentes geometrias de duto e de corrosão, Choi et al. (2003) realizaram ensaios experimentais, análises de elementos finitos e finalmente propuseram uma solução analítica para dutos de material X65 em função da profundidade e comprimento do defeito de corrosão assim como da geometria do duto. Foram ensaiados experimentalmente 7 espécimes com corrosão retangular externa usinada com cantos suavizados para evitar excessiva concentração de tensões. O modo de falha considerado foi colapso plástico para todos os espécimes com rompimento longitudinal na base do defeito. A ruptura foi precedida por uma deformação em forma de bolha em torno do defeito, típica para materiais de dutos de média a alta resistência. Na área do defeito, observou-se uma redução significativa de espessura ao longo da linha de rompimento causada por uma estricção local antes do colapso. A largura do defeito teve efeito insignificante na pressão de ruptura devido ao fato da pressão interna causar tensão circunferencial muito maior que a longitudinal. Nas análises de elementos finitos foi utilizado o programa comercial ABAQUS e elementos finitos sólidos considerando-se dois planos de simetria. Foram consideradas geometrias de corrosão retangulares (as mais severas) ou elípticas. A falha numérica do tubo que foi adotada após comparação com os ensaios experimentais é quando a tensão de Von Mises atingir a tensão de referência de 90% da tensão última verdadeira do material no nó mais solicitado para o defeito retangular e para o defeito elíptico 80% da tensão última verdadeira. O estudo paramétrico numérico foi realizado com 30 casos de corrosão elípticos (para estabelecer

critério de engenharia conservador) variando-se a geometria do duto e da corrosão. Aplicando análise de regressão nos resultados de elementos finitos a solução analítica foi estabelecida.

Guimarães (2005) em sua dissertação apresentou continuidade aos estudos de Choi et al. (2003). Análises de elementos finitos foram realizadas através do software ANSYS. Elementos de casca foram os utilizados em vez de elementos sólidos como em Choi et al. (2003). Foi desenvolvido um algoritmo para a geração automática das geometrias do duto e corrosão, geração da malha e aplicação das restrições e carregamentos. O estudo paramétrico totalizou 32 casos, variando-se a geometria do duto e da corrosão retangular utilizada. O critério de ruptura numérico estabelecido após comparações com os ensaios experimentais é a tensão de Von Mises atingir a tensão de referência de 90% da tensão última verdadeira do material no nó mais solicitado. Por análise de regressão foi obtida uma solução analítica, que se aproximou da solução obtida por Choi et al. (2003). Esta solução foi adequadamente conservadora em comparação com todos os 7 ensaios experimentais.

Valentini (2006) apresentou continuidade aos estudos de Guimarães (2005) no desenvolvimento de uma dissertação. Análises de elementos finitos foram realizadas através do software ANSYS, utilizando elementos de casca e onde foi adotado como critério de falha quando a tensão atinge valores iguais a tensão de ruptura do material. Como uma boa aproximação para o duto com corrosão discretizado com elementos de casca, o carregamento em que o primeiro elemento atinge a tensão efetiva de Von Mises igual a uma tensão de ruptura  $\sigma_{rup}$ , esta tensão será definida para cada caso. A análise de elementos finitos foi comparada aos métodos semi-empíricos B31G, 085dL, RPA e DNV.

Métodos de análise de confiabilidade estrutural são baseados em conceitos probabilísticos e procuram avaliar a probabilidade de falha de uma maneira realista. O conceito de confiabilidade estrutural foi desenvolvido por Freudenthal (1947), porém o desenvolvimento das técnicas matemáticas e estatísticas para este fim tiveram impulso significativo na década de 80 com os trabalhos de Ang e Tang (1984), Melchers (1987), Yang, Nikolaidis e Haftka (1990), que utilizaram a confiabilidade estrutural como metodologia para encontrar projetos seguros e econômicos. Outra aplicação importante é para o caso de estruturas já existentes onde parâmetros da resposta da estrutura ou carregamento são medidos e estas informações são utilizadas para atualizar a probabilidade de falha e com isso determinar planos de inspeção, conforme desenvolvido nos estudos de Kirkemo (1988), Madsen, Skojng e Kikermo (1987), Madsen, Sorensen e Olesen (1989).

Com base nestes estudos Sagrilo (1994) apresentou um estudo sobre a análise de confiabilidade utilizando os métodos FORM e SORM, apresentando uma metodologia de



análise e fornecendo alguns exemplos de aplicação do método em plataformas. Lee e Ang (1995) apresentaram uma metodologia para análise de estruturas trincadas.

Mais específico ao tema do presente trabalho, Ahammed e Melchers (1996) desenvolveram uma metodologia aplicada a dutos pressurizados com defeitos com o intuito de determinar o índice de confiabilidade utilizando o método FORM. Dando continuidade a este estudo Ahammed (1996) efetuou uma análise da resistência residual a dutos pressurizados. Dando seqüência ao estudo de confiabilidade estrutural, Ahammed (1998) desenvolveu uma metodologia para determinar a vida residual de uma tubulação com defeitos de corrosão ativa utilizando o método FORM. Este estudo de Ahammed (1998) serviu como base para validação dos modelos do presente trabalho.

Caleyo (2002) apresentou um estudo da probabilidade de falha de dutos com corrosão ativa, utilizando o método de confiabilidade probabilística iterativo de primeira ordem e segundo momento aplicado aos métodos semi-empíricos B31G, 085dL, Battele e DNV e ao método dos elementos finitos de casca. Além disso, apresenta uma comparação sobre os métodos de confiabilidade probabilística iterativo de primeira ordem, integração de Monte Carlo e expansão de primeira ordem da série de Taylor. Outro estudo mantendo a mesma linha de pesquisa foi apresentado por Torres (2007) que desenvolveu uma metodologia para análise probabilística aplicada a dutos com defeitos de corrosão. Outro estudo desenvolvido por Hatashita (2007) aplicou a análise de confiabilidade estrutural a torres de transmissão de energia elétrica sujeita a ventos fortes, utilizando também o método analítico FORM.

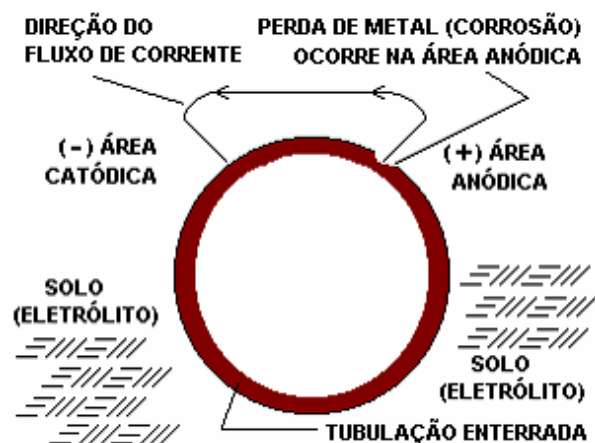
## 2 CORROSÃO E OS DUTOS

### 2.1 Corrosão

O termo “corrosão” pode ser definido, segundo Ramanathan (2004), como a reação do metal com os elementos do seu meio, na qual o metal é convertido a um estado não metálico. Quando isto ocorre, o metal perde suas qualidades essenciais, tais como resistência mecânica, elasticidade, ductilidade e o produto de corrosão formado é extremamente pobre em termos destas propriedades.

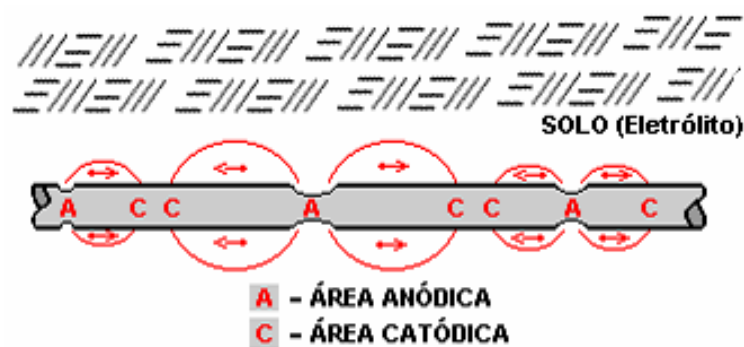
A corrosão pode ser devido à ação química ou eletroquímica do meio. Um duto enterrado, por exemplo, possui corrosão de localização externa tipicamente eletroquímica, e corrosão interna podendo ser química devido aos produtos que são transportados e/ou eletroquímica se houver água condensando. A corrosão externa eletroquímica normalmente é mais severa se houver falha das proteções.

A corrosão eletroquímica ocorre porque os potenciais elétricos podem variar de um ponto da tubulação para outro, como resultado da existência de áreas anódicas e catódicas. Estas áreas de diferentes potenciais elétricos são as bases para uma célula de corrosão, conforme as **Figuras 2.1 e 2.2**. A causa pela qual formam-se áreas anódicas e catódicas pode ser por fatores tais como material dissimilar, ou seja, quando materiais diferentes são empregados na fabricação do duto ou pela passagem do duto por solos dissimilares. Um caso clássico de solos dissimilares envolve aço no solo versus aço no concreto. O ambiente eletrolítico do concreto é totalmente diferente do ambiente do solo usual circunvizinho, resultando em diferenças significativas no aço em relação ao potencial do ambiente. Em regra tem-se o aço no solo como anódico em relação ao aço embutido no concreto. Uma condição bastante semelhante à da corrosão de metais dissimilares ocorre quando uma nova tubulação de aço é inserida numa tubulação velha - usualmente em decorrência de substituição por corrosão. O novo trecho de tubulação é exposto às mesmas condições de solo, assim, seria lógico supor que o trecho de tubulação nova deveria ter uma vida útil igual a da tubulação antiga. Entretanto, esta nova tubulação falhará muito antes que o esperado, pois seguindo uma série galvânica pode-se notar que o potencial da tubulação nova é diferente da velha e enferrujada.



**Figura 2.1** – Célula de corrosão básica.

Fonte: ABRACO (2008)



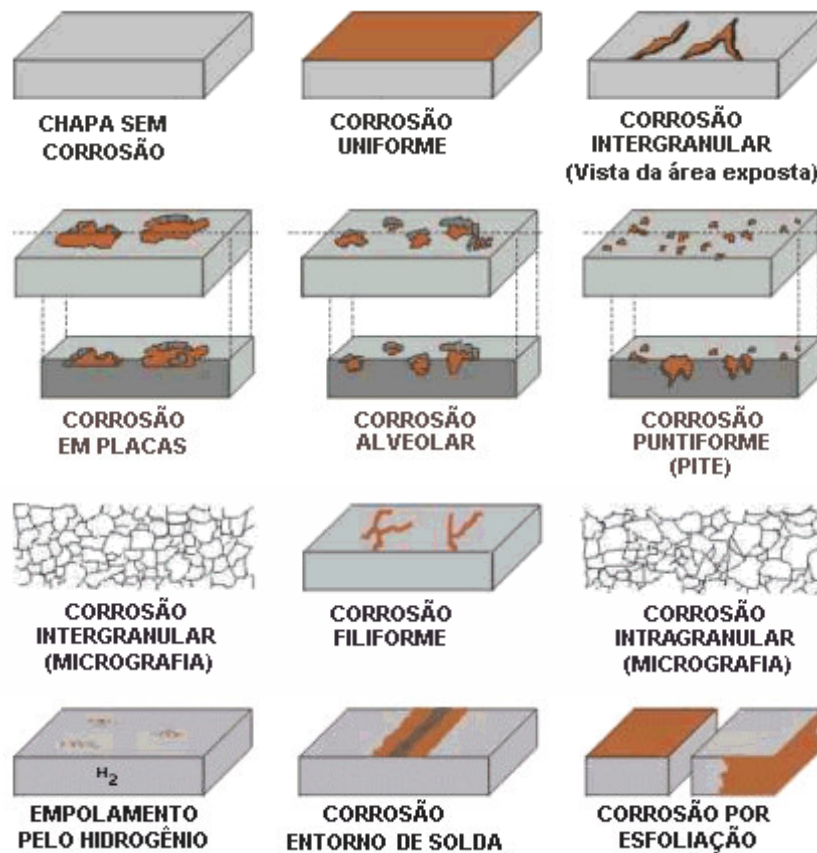
**Figura 2.2** – Múltiplas células de corrosão ao longo de tubulação enterrada.

Fonte: ABRACO (2008)

A corrosão pode ocorrer sob diversas formas e o conhecimento das mesmas é muito importante no estudo e modelagem de um processo corrosivo. Assim, a corrosão poderá ser, segundo GENTIL (2003):

- uniforme;
- por placas;
- alveolar;
- puntiforme ou pite;
- intergranular (ou intercrystalina);
- intragranular (ou transgranular ou transcristalina);
- filiforme;
- por esfoliação.

As diversas formas de corrosão estão esquematizadas na **Figura 2.3**.



**Figura 2.3** – Formas de Corrosão.  
Fonte: ABRACO (2006)

### 2.1.1 Controle de Corrosão nos Dutos

O controle efetivo da corrosão pode estender a vida útil de todos os dutos. O grande risco de falha dos dutos ultrapassa de longe os custos associados à instalação, monitoramento, e manutenção dos sistemas de controle de corrosão. Quando os operadores dos dutos avaliam seus riscos, o controle da corrosão é parte essencial de tais avaliações. A manutenção e monitoramento preventivos evitando a deterioração e falha dos dutos economiza dinheiro, preserva o meio ambiente e garante a segurança pública.

A avaliação do ambiente no qual o duto será colocado é muito importante para o controle da corrosão, não importando quais métodos de controle ou combinações deles sejam usadas. Modificar o ambiente ao redor do duto, como reduzir a umidade ou melhorar a drenagem do solo, pode ser um modo simples e efetivo de reduzir o potencial de corrosão.

### 2.1.1.1 Métodos de Controle de Corrosão

Os principais métodos descritos pela Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO, 2008) para controle de corrosão nos dutos serão apresentados a seguir:

**Isolamento Elétrico:** O primeiro passo básico no controle da corrosão é o de isolar a tubulação de estruturas metálicas estranhas. Uma estrutura metálica estranha pode ser outras tubulações, conduítes elétricos, e provavelmente, a mais comum, aço de reforço concretado. Obviamente o isolamento elétrico não irá prevenir células de corrosão localizadas na tubulação. O isolamento elétrico reduz o problema de controle da corrosão em relação aos efeitos do ambiente solo sobre a própria tubulação.

**Revestimentos:** Os revestimentos normalmente têm a finalidade de formar um filme contínuo, constituído de material isolante, sobre uma superfície metálica que se pretende isolar. Um revestimento será um meio efetivo de interromper a corrosão se:

1. o material de revestimento for um efetivo isolante elétrico.
2. puder ser aplicado sem interrupções ou descontinuidades, e resistir íntegro durante o transporte, instalação e operação de enterramento.
3. o revestimento prover inicialmente um filme quase perfeito e assim permanecer ao longo do tempo.

Os revestimentos variam em qualidade quando inicialmente aplicados, e na resistência durante o manuseio e instalação. As inspeções de controle de material, aplicação, fornecimento da tubulação e instalação afetam tanto a qualidade quanto o custo.

Numa tubulação revestida, instalada e enterrada, pode-se esperar que apresente pontos danificados ou imperfeições no revestimento (furos, falhas) que permitem que o solo mantenha contato com o metal. Qualquer célula de corrosão deve estar numa área de furo, falha ou se constituir de dois furos - um furo catódico e outro anódico.

A longevidade de revestimentos é um assunto complexo. A força dielétrica e a permeabilidade são relativamente pouco afetadas ao longo do tempo no ambiente do subsolo. Contudo, a resistência tubulação - solo irá declinar, em específico nos primeiros anos, vez que as áreas parcialmente danificadas se degradam e vez que movimentações do solo ocorrem causando danos posteriores. Numa tubulação tipicamente bem revestida, a instalação completa deve ter uma eficiência de revestimento, melhor do que 99%.

**Proteção Catódica:** A proteção catódica, descrita numa forma bem simples, é o uso direto de eletricidade corrente de uma fonte externa, em oposição da corrente de descarga da corrosão de áreas anódicas que estarão naturalmente presentes. Quando um sistema de proteção catódica eficaz é instalado, todas as partes da corrente coletada da estrutura protegida do eletrólito circunvizinho e toda a superfície exposta se tornam uma única área catódica - daí o nome.

A galvanização tem um passado histórico no uso de redução da corrosão em tubulações. A galvanização é, com efeito, um sistema de proteção catódica, utilizando o zinco, dispersado sobre a superfície da tubulação, como material de anodo de sacrifício.

Uma tubulação bem revestida, isto é, revestida com fita, sem dúvida terá alguns defeitos de revestimento ou furos. Um sistema de proteção catódica somente necessitará proteger as pequenas áreas de aço expostas à terra nestes pontos, ao invés de proteger toda a superfície de uma tubulação não revestida. A energia elétrica necessária para proteger toda uma tubulação nua, poderá ser milhares de vezes maior do que a energia requerida para proteger a mesma estrutura se esta estiver revestida.

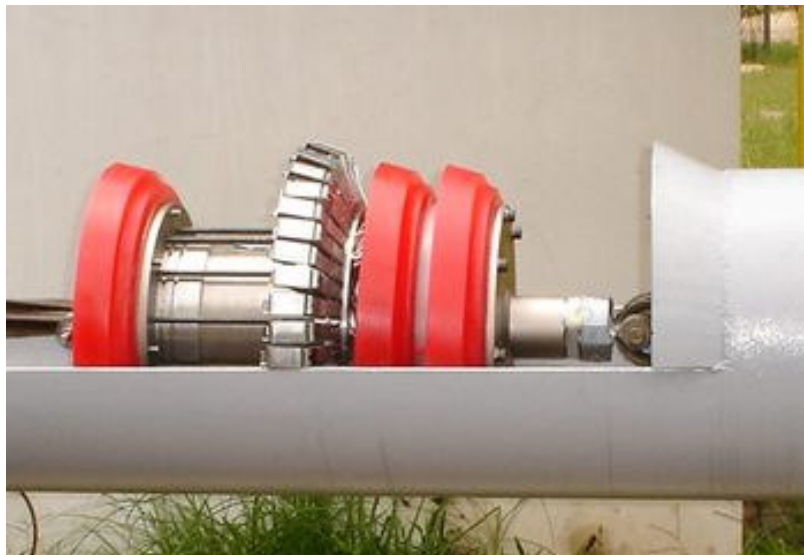
### **2.1.1.2 Métodos de Inspeção dos Dutos**

Para evitar problemas com a corrosão em dutos, as empresas operadoras de dutos inspecionam periodicamente suas linhas. Uma inspeção normalmente é realizada por empresas especializadas, as quais fazem uso de equipamentos instrumentados, unidos de sensores de variados tipos. Os sensores coletam dados sobre o estado do duto em questão, e tais informações posteriormente são analisadas por especialistas.

O equipamento mais utilizado atualmente para inspeção de dutos é o inspetor interno de dutos, que recebe a denominação de PIG. O PIG é um robô autônomo instrumentado com sensores dos mais variados tipos que percorre o duto internamente, com o objetivo de coletar informações relativas ao estado do duto em questão. Este equipamento tem o nome de PIG, pois como o fluxo do duto não é interrompido (é o fluxo do duto que movimenta o PIG), o PIG realiza a inspeção imerso no fluido (gás, ar, água ou óleo que são injetados no duto).



**Figura 2.4** – Pig de corrosão.  
Fonte: PipeWay (2008)



**Figura 2.5** – Pig de corrosão sendo inserido em um duto.  
Fonte: PipeWay (2008)

No entanto, nem todas as linhas permitem o uso do PIG. Existem dois casos principais onde o PIG não pode ser utilizado: quando o PIG não pode passar por algum ponto do duto (curvas muito acentuadas, grande variação de diâmetro ou bifurcações); e quando o duto não foi projetado para receber um PIG (o duto não possui uma estrutura que permita colocar e retirar o PIG). Tais linhas são chamadas de "linhas não-PIGáveis". Para essas linhas, um dos equipamentos utilizados atualmente para inspeção é o inspetor externo de dutos (IED), um robô que percorre o exterior de dutos, abraçando-os.



**Figura 2.6** – Inspetor externo de dutos (IED).  
Fonte: Offshore technology (2006)

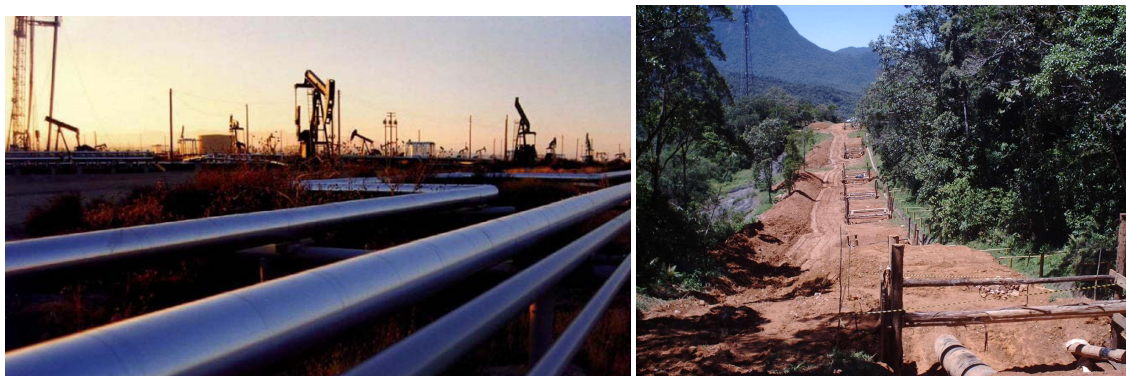
O fato do IED ser usado externamente traz à tona algumas questões que inviabilizam o uso do mesmo sistema usado em PIGs. Por exemplo, ao contrário do PIG, o IED precisa ser montado e desmontado a cada obstáculo (suportes, junções, curvas acentuadas, etc.) encontrado. Além de não poder ser utilizado em tubulações subterrâneas.

## 2.2 Os Dutos

Um duto (*pipeline*) é uma linha de condução de fluido, composto por vários segmentos, os tubos, unidos normalmente por soldas circunferenciais. Os dutos se destinam ao transporte de fluidos ao longo de grandes distâncias, se classificando quanto ao emprego como tubulações de transporte. O oleoduto ou poliduto é um duto destinado ao transporte de petróleo e seus derivados líquidos, podendo também transportar outras variedades de líquidos, como álcool. O gasoduto, por sua vez, se destina ao transporte de grandes volumes de gases, principalmente o gás natural.

O conjunto de dutos é conhecido como dutovia e esta pode ser classificada conforme a sua construção em terrestres e submarinos, sendo que os terrestres operam em terra e se subdividem em subterrâneos, aparentes e aéreos. A seguir a figura 2.7 mostra exemplos de dutovias com dutos aparentes e subterrâneos.





(a)

(b)

**Figura 2.7** – (a) Dutovia com dutos aparentes. Fonte: Startrak (2006),

(b) Dutovia com dutos subterrâneos. Fonte: Cesec (2006),

Os dutos aéreos são aqueles necessários para vencer vales, cursos d'água, pântanos ou terrenos muito acidentados. Tornam-se viáveis com a construção de torres metálicas nas extremidades dos obstáculos e quando necessárias, torres intermediárias que servirão de suporte para a tubulação que ficará presa a elas por meio de cabos.

Os dutos submarinos são assim denominados devido à que a maior parte da tubulação está submersa no fundo do mar. Este método é geralmente utilizado para o transporte da produção de petróleo de plataformas marítimas (off-shore) para refinarias ou tanques de armazenagem situados em terra (on-shore). Também são utilizadas para atravessar baías ou canais de acesso a portos. Os emissários são considerados dutos submarinos.

A fabricação dos tubos para a indústria de óleo e gás natural segue em grande parte estas normas associadas: API (*American Petroleum Institute*) [API (1999 e 2000)] e ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) [ASME (1995)].

Os tubos podem ser fabricados com uma imensa variedade de materiais. As duas categorias principais são: metálicos e não metálicos. Dentre os materiais metálicos, encontram-se os ferrosos e não ferrosos. Os aços-carbono são materiais ferrosos, a base de ferro e carbono, podendo apresentar adição de outras ligas para melhora de determinadas propriedades, sendo então chamados aços-liga. Os tubos de aço-carbono são de uso geral devido ao seu baixo custo, excelentes qualidades mecânicas e facilidade de solda. Por isso representam a grande maioria dos tubos em tubulações industriais. Até o presente momento, os tubos que formam os dutos são normalmente de aço-carbono ou aço-liga.

A norma API 5L [API (2000)] possui especificações em relação ao material e processo de fabricação dos tubos. Estabelece dois níveis de especificação do produto (PSL - *Product Specification Level*): PSL 1 e PSL 2. Essas duas designações determinam diferentes níveis de

requisitos técnicos padrões, tendo a especificação PSL 2 mais requisitos do que a outra. Dentro dessas especificações estão as propriedades dos aços utilizados para este fim.

A **Tabela 2.1** apresenta os requisitos de resistência à tração (valores de engenharia) para PSL 2. A diferença neste aspecto em relação aos materiais que existem em grau comum à PSL 1, é que neste caso, não se determinam os valores máximos de resistência à tração, como para PSL 2. Os valores mínimos são coincidentes para ambas as especificações. O grau X80 existe apenas como PSL 2 e o grau A apenas como PSL 1. Outras exigências exclusivas aos tubos PSL 2, são obrigatoriedade de rastreabilidade, valores definidos de tenacidade à fratura, etc. Sendo assim, os materiais PSL 2 são mais caros e seguros. Sua escolha depende de fatores variados conforme a aplicação, como área de localização do duto, produto transportado, etc.

**Tabela 2.1.** - Requisitos de resistência à tração para os aços PSL 2

API 5L Grau	Mínima Tensão de Escoamento		Máxima Tensão de Escoamento		Mínima Tensão de Ruptura		Máxima Tensão de Ruptura	
	(kpsi)	(Mpa)	(kpsi)	(Mpa)	(kpsi)	(Mpa)	(kpsi)	(Mpa)
<b>B</b>	35	241	65	448	60	414	110	758
<b>X42</b>	42	290	72	496	60	414	110	758
<b>X46</b>	46	317	76	524	63	434	110	758
<b>X52</b>	52	359	77	531	66	455	110	758
<b>X56</b>	56	386	79	544	71	490	110	758
<b>X60</b>	60	414	82	565	75	517	110	758
<b>X65</b>	65	448	87	600	77	531	110	758
<b>X70</b>	70	483	90	621	82	565	110	758
<b>X80</b>	80	552	100	690	90	621	120	827

Fonte: API (2000)

## **3 MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS DUTOS**

Neste capítulo são apresentados alguns métodos para avaliação da resistência em dutos. Para isso, primeiramente, são apresentados os conceitos básicos de mecânica dos sólidos envolvidos no cálculo de tensão em dutos, isso sem levar em consideração os defeitos de corrosão. Na seqüência são apresentados os métodos analíticos semi-empíricos para o cálculo da resistência em dutos. Em seguida serão apresentados os métodos experimentais, finalizando com os métodos numéricos, sendo estes auxiliados pelo método dos elementos finitos.

### **3.1 Mecânica dos Sólidos**

A Mecânica dos Meios Contínuos e mais especificamente a Teoria da Elasticidade têm, como preocupação básica, o desenvolvimento de modelos matemáticos que possam representar adequadamente a situação física real de componentes industriais sujeitos aos esforços mecânicos.

No contexto da Mecânica dos Sólidos, são apresentadas nesta seção as equações de deformações-deslocamentos, as equações constitutivas para materiais isotrópicos e a formulação para tubo cilíndrico de parede fina de comprimento infinito com extremidades fechadas submetido à pressão interna.

#### **3.1.1 Equações Deformações-Deslocamentos**

Os deslocamentos referentes a um sistema de coordenadas podem ser observados fisicamente, calculados ou medidos para um determinado corpo elástico deformado. Para cada deslocamento consideram-se duas componentes, uma devido a movimentos relativos ou distorções na estrutura, e outra uniforme através da estrutura denominada movimento de

corpo rígido. As relações entre os deslocamentos e as distorções correspondentes são formuladas pelas equações denominadas de deformações-deslocamentos.

A partir do campo vetorial de deslocamentos, podem-se calcular as deformações em qualquer ponto de uma estrutura tridimensional. As equações deformações-deslocamentos para a elasticidade linear infinitesimal tridimensional representam adequadamente as deformações somente se estas forem bem pequenas (décimos de milésimos). Seguem estas equações conforme Gould (1994):

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (\text{a})$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad (\text{b})$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (\text{c})$$

(3.1)

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (\text{d})$$

$$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (\text{e})$$

$$\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (\text{f})$$

onde  $u_x$ ,  $u_y$  e  $u_z$  são as componentes do vetor deslocamento  $u$  nas direções cartesianas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. As deformações das **equações (3.1 (a), (b) e (c))** são deformações normais e as das **equações (3.1 (d), (e) e (f))** deformações cisalhantes ou distorções angulares. As deformações normais causam alongamento e as deformações cisalhantes rotações nas fibras do material em relação ao sistema de coordenadas cartesiano. As **equações (3.1)** podem ser colocadas na forma matricial,

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \quad (\text{3.2})$$

ou seja,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Equações Constitutivas

No presente trabalho o material utilizado para os cálculos estruturais é o aço, e este material pode ser adequadamente aproximado como sendo material isotrópico. Este material pode ser completamente definido por duas constantes de engenharia. As equações constitutivas (equações tensões-deformações) para materiais elásticos lineares isotrópicos são dadas pela Lei de Hooke generalizada. Seguem estas equações conforme Gould (1994):

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz} \quad (a)$$

$$\sigma_{yy} = \lambda\varepsilon_{xx} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz} \quad (b)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} \quad (c)$$

$$\sigma_{xy} = 2\mu\varepsilon_{xy} \quad (d)$$

$$\sigma_{yz} = 2\mu\varepsilon_{yz} \quad (e)$$

$$\sigma_{zx} = 2\mu\varepsilon_{zx} \quad (f)$$

(3.4)

onde a primeira constante de Lamé pode ser expressa como,

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.5)$$

e a segunda constante de Lamé (é igual ao módulo de cisalhamento  $G$ ) por,

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.6)$$

sendo  $E$  o módulo de elasticidade longitudinal e  $\nu$  o coeficiente de Poisson do material, que são as duas constantes de engenharia. Para materiais cujas propriedades variam com as direções, como os materiais reforçados por fibras ou laminados a frio, devem-se usar relações constitutivas apropriadas, com propriedades elásticas dependentes da direção. As **equações (3.4)** podem ser colocadas na forma matricial,

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (3.7)$$

ou seja,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mu + \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 2\mu + \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & 2\mu + \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2\mu & 0 & 0 \\ & & & & 2\mu & 0 \\ & & & & & 2\mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

ou em notação indicial,

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk} \quad (3.9)$$

Invertendo-se a **equação (3.9)** para expressar as deformações em função das tensões, obtém-se:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{ij} - \frac{\lambda}{2\mu(2\mu + 3\lambda)} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (3.10)$$

onde  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker,

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 \rightarrow i \neq j \\ 1 \rightarrow i = j \end{cases} \quad (3.11)$$

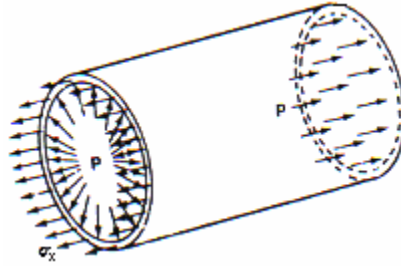
### 3.1.3 Tubo Cilíndrico de Parede Fina de Comprimento Infinito com Extremidades Fechadas Submetido à Pressão Interna

Os cilindros de parede fina são bastante usados no transporte e armazenamento de líquidos e gases assim como para vasos de pressão. As tensões que se desenvolvem nestas estruturas devido às pressões internas uniformes do líquido ou gás contido no seu interior serão apresentadas nesta seção. Conforme Hibbeler (1997), quando a espessura da parede do tubo  $t$  é pequena em relação ao seu raio interno  $r$  ( $r/t \geq 10$ ) pode-se considerar o tubo como sendo de paredes finas. Para este caso, a distribuição de tensões através da espessura não varia significativamente, e será assumida como sendo uniforme ou constante. Obtém-se uma solução aproximada suficientemente precisa a partir das seguintes equações de equilíbrio segundo Branco (1989):

- a) equilíbrio axial;
- b) equilíbrio circunferencial.

#### Equilíbrio Axial

A força que atua em cada extremidade fechada do cilindro de comprimento infinito e paredes finas devido à pressão interna  $P$  é dada pelo produto da pressão pela área em que esta atua (**Figura 3.1**).



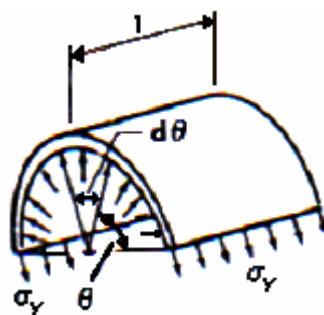
**Figura 3.1** - Equilíbrio axial.  
Fonte: Branco (1989)

A força axial será igual a  $(P \pi r^2)$ . O equilíbrio axial ocorre devido à ação da força axial e da tensão axial  $\sigma_{xx}$  no material. A pressão radial não causa nenhuma força resultante. A área da seção transversal do material é aproximadamente  $(2 \pi r t)$ . Portanto, a força interna é  $(\sigma_{xx} 2 \pi r t)$  e no equilíbrio, esta força terá de ser igual à força causada pela pressão interna:

$$\sigma_{xx} = \frac{Pr}{2t} \quad (3.12)$$

### Equilíbrio Circunferencial

A **Figura 3.2** representa a metade do cilindro de comprimento unitário cortado por um plano perpendicular ao seu eixo longitudinal.



**Figura 3.2** - Equilíbrio circunferencial.  
Fonte: Branco (1989)

A pressão interna deve estar em equilíbrio com a tensão circunferencial  $\sigma_{yy}$ , o que no elemento do representado, dá uma componente vertical da força devido à pressão igual a  $(P r l \text{ sen } \theta d\theta)$ , sendo  $\theta$  o ângulo considerado. Portanto, a força vertical total devido à pressão é:



$$\int_0^x Pr \sin \theta d \theta = 2 Pr \quad (3.13)$$

Esta equação também pode ser obtida considerando a pressão que atua na área projetada do diâmetro ( $2r$ ). Isto demonstra que a força vertical é independente da forma do cilindro.

A força interna necessária para o equilíbrio pode ser obtida a partir da tensão  $\sigma_{yy}$  que se exerce nas duas extremidades da fatia da casca de área ( $2t l$ ). Deste modo, a força interna é ( $\sigma_{yy} 2t l$ ). Para haver equilíbrio,

$$\sigma_{yy} = \frac{Pr}{t} \quad (3.14)$$

Comparando as equações (3.12) e (3.14), vê-se que a tensão circunferencial é o dobro da axial. Por esta razão, a tensão circunferencial apresentada é a utilizada na formulação dos métodos analíticos semi-empíricos da seção 3.3. A **Figura 3.3** representa um pequeno elemento de casca, indicando as tensões axiais e circunferenciais.



**Figura 3.3** - Tensões axiais e circunferenciais.  
Fonte: Branco (1989)

## 3.2 Métodos Analíticos Semi-Empíricos

Os métodos analíticos semi-empíricos são baseados em equações da mecânica da fratura para a predição da pressão de ruptura a qual o duto com defeito pode ser submetido.

Dentre os diversos métodos semi-empíricos encontrados na literatura, o ASME B31G, o método 085dL ou B31G modificado, o método RPA ou 085dL modificado, o DNV RPF101 e o Battelle PCORRC, terão suas formulações expostas a seguir.

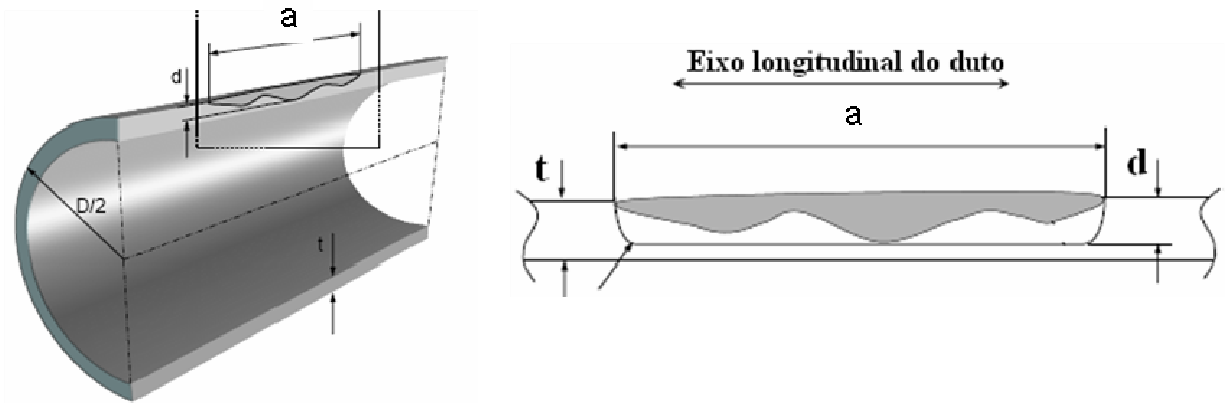
O método B31G da ASME (1991), apesar de ser o mais utilizado, é também, o que apresenta resultados mais conservadores, podendo ser bastante antieconômico. Segundo este método, um duto com defeito de corrosão com a relação  $d/t$  maior que 0,8 (profundidade do defeito maior que 80% da espessura da parede do duto) deve ser reparado ou substituído. Se a relação  $d/t$  for menor que 0,1, o duto pode continuar operando normalmente, e para as condições intermediárias deve ser utilizado o método para avaliação. O conservadorismo do método B31G é reconhecido como excessivo para defeitos de corrosão longos.

Esse método, que avalia dutos submetidos apenas à pressão interna, foi posteriormente modificado por Kiefner e Vieth (1989) com a implementação dos métodos método 085dL ou B31G modificado, menos conservadores que o B31G, mas ainda assim, as pressões máximas recomendadas ficam abaixo das pressões de ruptura que se observam em ensaios experimentais. No entanto, o método *085dL* não foi mais amplamente utilizado por muitas vezes apresentar resultados contra a segurança para defeitos uniformes longos e profundos. Por esta razão foi modificado por Benjamin (2003) para criar o método RPA ou *085dL Modificado*.

Através de diversos ensaios experimentais e análises numéricas desenvolvidas pela BG Technology e a Det Norske Veritas - DNV (1999), surge o método DNV RP-F101, que além da pressão interna, admite tensões de compressão longitudinais, e apresenta resultados mais realísticos que os demais métodos. O procedimento DNV RP-F101 é o único dos procedimentos apresentados que não classifica a corrosão em relação ao seu comprimento, como curto ou longo; a formulação é única. A largura dos defeitos de corrosão para o caso de somente pressão interna, não influi muito nos resultados e é desconsiderada por todos os métodos. Esta largura tem alguma influência e é considerada pelo procedimento DNV RP-F101 quando considera-se o carregamento de compressão. Este último método apresenta resultados próximos aos do PCORRC, que é também mais coerente que os primeiros.

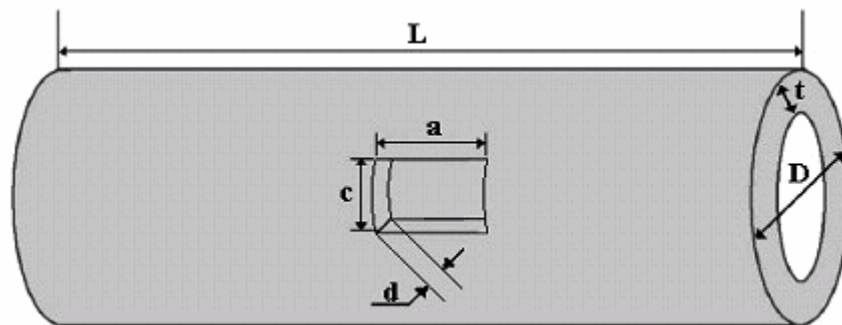
Não serão considerados neste trabalho os fatores de segurança que serão explicados a seguir, apenas a pressão de falha para os dutos corroídos ( $P_f$ ) de acordo com cada método.

Apesar de a corrosão possuir uma dimensão irregular, pode-se aproximar a dimensão do defeito por um perfil retangular considerando as dimensões de profundidade, largura e comprimento de corrosão são as máximas encontradas em cada defeito para os cálculos.. Conforme descrito nas figuras abaixo:



**Figura 3.4** – Aproximação dimensional dos defeitos de corrosão

Obtendo, portanto o seguinte modelo que será utilizado no decorrer do trabalho considerando a nomenclatura abaixo:



**Figura 3.5** - Geometria dos dutos com defeitos de corrosão

Na **Figura 3.5** utiliza-se a seguinte nomenclatura:

- $D$  diâmetro externo do duto;
- $L$  comprimento do duto;
- $t$  espessura da parede do duto;
- $a$  comprimento da corrosão;
- $c$  largura da corrosão;
- $d$  profundidade da corrosão.

### 3.2.1 Formulação Geral dos Métodos para Carregamento de Pressão Interna

Os métodos existentes para predição de falha do duto contendo defeito de corrosão baseiam-se numa relação semi-empírica da mecânica da fratura, que possuem uma formulação básica geral para carregamento de pressão interna que será apresentada a seguir.

A seguinte simbologia deve ser considerada:

$\sigma_{flow}$	tensão de fluência no material do duto;
$\sigma_{rup}$	tensão de ruptura do material do duto;
$\sigma_Y$	tensão de escoamento do material do duto;
$\sigma_u$	tensão última do material do duto;
$\sigma_{circ}$	tensão circunferencial do duto;
$\alpha$	fator empírico;
$f_r$	fator de redução;
$A$	área longitudinal de perda de metal devido à corrosão;
$A_0$	área longitudinal do duto sem corrosão;
$M$	fator de dilatação de Folias, é adimensional e leva em conta o comprimento da corrosão;
$P$	Pressão interna atuante no duto;
$P_f$	Pressão de falha, ou seja, pressão interna atuante no duto para ruptura do material.

A equação básica NG-18 *Surface Flaw Equation* é a mais usada, sendo expressa por:

$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} \cdot f_r \quad (3.15)$$

A tensão de fluência no material ( $\sigma_{flow}$ ) é uma propriedade relacionada com a tensão de escoamento do material ( $\sigma_y$ ). Existem pelo menos três diferentes relações para a tensão de fluência no material disponível na literatura. A primeira relação é recomendada para o método B31G e é dada por:

$$\sigma_{flow} = 1,10 \cdot \sigma_y \quad (3.16)$$

A segunda relação foi obtida experimentalmente e mantém uma melhor estimativa da tensão de fluência. Esta relação é recomendada para o método 085dL ou B31G modificado, e é dada por:

$$\sigma_{flow} = \sigma_y + 68,95Mpa \quad (3.17)$$

A terceira relação é recomendada para o método DNV, e é dada por:

$$\sigma_{flow} = \sigma_u \quad (3.18)$$

O fator de redução ( $f_r$ ) é obtido pela seguinte equação:

$$f_r = \left[ \frac{1 - \alpha \left( \frac{A}{A_0} \right)}{1 - \alpha \left( \frac{A}{A_0} \right) M^{-1}} \right] \quad (3.19)$$

onde:

$$A_0 = a \cdot t \quad (3.20)$$

$$A = a \cdot d \quad (3.21)$$

Tem-se que a tensão circunferencial do duto é dada por:

$$\sigma_{circ} = P \cdot \left( \frac{D}{2 \cdot t} \right) \quad (3.22)$$

No estado limite,  $\sigma_{circ} = \sigma_{rup}$ , portanto nesta situação particular atribui-se P como sendo a pressão de ruptura ( $P_f$ ). Substituindo então as equações anteriores tem-se:

$$P_f = \frac{2 \cdot \sigma_{rup} \cdot t}{D} = \sigma_{flow} \cdot \left( 2 \cdot \frac{t}{D} \right) \left[ \frac{1 - \alpha \left( \frac{d}{t} \right)}{1 - \alpha \left( \frac{d}{t} \right) M^{-1}} \right] \quad (3.23)$$

### 3.2.1.1 Fatores de Segurança

Para o cálculo da pressão de operação admissível  $P_a$  do tubo corroído, utiliza-se um fator de segurança de projeto  $F_d$  que pode ser aplicado na equação de falha:

$$P_a = F_d P_f \quad (3.24)$$

com,

$$P_a \leq P_0 \quad (3.25)$$

Onde  $P_0$  é a pressão de falha para o duto de parede fina sem corrosão. E pode ser calculado a partir da **equação (3.14)**, resultando em:

$$P_0 = \frac{\sigma_{flow} 2t}{D} \quad (3.26)$$

O método DNV RP-F101 considera ainda o fator de modelagem  $F_m = 0,9$  sempre aplicado:

$$P_a = F_m F_d P_f \quad (3.27)$$

### 3.2.2 Método B31G

Este método utiliza o fator  $\alpha = 2/3$  para defeitos curtos e  $\alpha = 1$  para defeitos longos com  $\sigma_{flow} = 1,1 \sigma_y$ .

$$M = \left[ 1 + 0,8 \frac{a^2}{Dt} \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

a) para  $a \leq \sqrt{20Dt}$  (defeitos curtos)

$$P_f = \frac{1,1\sigma_y 2t}{D} \left[ \frac{1 - \frac{2}{3} \left( \frac{d}{t} \right)}{1 - \frac{2}{3} \left( \frac{d}{t} \right) M^{-1}} \right] \quad (3.29)$$

b) para  $a > \sqrt{20Dt}$  (defeitos longos)

$M \rightarrow \infty$  (defeitos são considerados infinitamente longos)

$$P_f = \frac{1,1\sigma_y 2t}{D} \left(1 - \frac{d}{t}\right) \quad (3.30)$$

### 3.2.3 Método 085dL ou B31G Modificado

Este método utiliza o fator  $\alpha = 0,85$  com  $\sigma_{flow} = \sigma_y + 68,95$  MPa.

a) para  $a \leq \sqrt{50Dt}$  (defeitos curtos)

$$M = \sqrt{1 + 0,6275 \frac{a^2}{Dt} - 0,003375 \left(\frac{a^2}{Dt}\right)^2} \quad (3.31)$$

b) para  $a > \sqrt{50Dt}$  (defeitos longos)

$$M = 3,3 + 0,032 \frac{a^2}{Dt} \quad (3.32)$$

Para defeitos curtos e longos:

$$P_f = (\sigma_y + 68,95 \text{ MPa}) \frac{2t}{D} \left[ \frac{1 - 0,85 \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - 0,85 \left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}} \right] \quad (3.33)$$

### 3.2.4 Método RPA ou 085dL Modificado

Este método utiliza o fator  $\alpha = 0,85$  para defeitos curtos e  $\alpha$  variável para defeitos longos com  $\sigma_{flow} = \sigma_y + 68,95$  MPa.

a) para  $a \leq \sqrt{20Dt}$  (defeitos curtos), a formulação é idêntica a do método *085dL* ou B31G Modificado, para defeitos curtos.

b) para  $a > \sqrt{20Dt}$  (defeitos longos)

$$\alpha = 1 - 0,15 \frac{(64 \times 10^6)}{\left(\frac{a^2}{Dt}\right)^6} \quad (3.34)$$

$$M = 2,1 + 0,07 \frac{a^2}{Dt} \quad (3.35)$$

$$P_f = (\sigma_y + 68,95 MPa) \frac{2t}{D} \left[ \frac{1 - \alpha \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \alpha \left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}} \right] \quad (3.36)$$

### 3.2.5 Método DNV RP-F101

Apesar deste método admitir carregamentos axiais, por não ser objeto do presente trabalho, será apresentada somente a sua formulação referente ao cálculo da pressão máxima admissível de dutos sujeitos apenas à pressão interna.

Este método utiliza o fator  $\alpha = 1$  com  $\sigma_{flow} = \sigma_u$ .

$$M = \left[ 1 + 0,31 \frac{a^2}{Dt} \right]^{1/2} \quad (3.37)$$

$$P_f = \frac{\sigma_u 2t}{D - t} \left[ \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t} M^{-1}} \right] \quad (3.38)$$



### 3.2.6 Método PCORRC ou Battelle

Este método apresenta a seguinte formulação:

$$M = 1 - \exp \left[ -0,157 \cdot \frac{a}{\sqrt{D \left( t - \frac{d}{2} \right)}} \right] \quad (3.39)$$

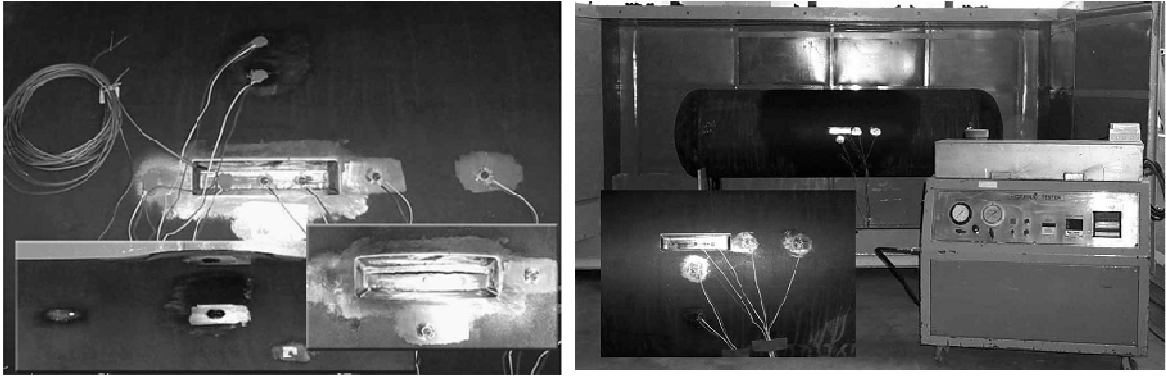
$$P_f = \frac{\sigma_u 2t}{D} \left[ 1 - \left( \frac{d}{t} \right) \cdot M \right] \quad (3.40)$$

Os métodos apresentados juntamente com as aproximações descritas nos métodos numéricos serão utilizados no decorrer do presente trabalho no desenvolvimento da análise comparativa para pressão de falha e índice de confiabilidade.

## 3.3 Métodos Experimentais

Os métodos experimentais consistem no ensaio de dutos corroídos, artificialmente ou não, e, preferencialmente, em escala real. Os resultados dos experimentos são importantes no desenvolvimento de métodos empíricos, para testar suas eficácias, bem como determinar os fatores empíricos de suas formulações. Além disso, são importantes também, em testes e calibrações de modelos numéricos, que serão explorados mais adiante.

Os ensaios experimentais de dutos com defeitos de corrosão (*burst tests*) são realizados até a ruptura. Os tubos são fechados com tampas soldadas em suas extremidades e pressurizados internamente com água. Os valores de pressão e as deformações são medidos, estas últimas através de extensômetros (*strain gages*). As figuras a seguir exemplificam a preparação do duto e os equipamentos utilizados para a realização do *burst test*.



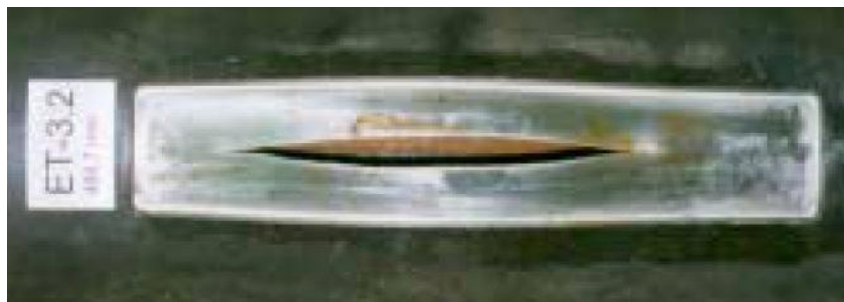
**Figura 3.6** – Preparação do duto e equipamentos utilizados para *Burst test*.  
Fonte: Choi *et al.* (2003)

Durante o ensaio experimental a ruptura ocorre na região do defeito de corrosão onde se concentram as tensões e por colapso plástico para os materiais de média a elevada resistência. As **Figuras 3.7 e 3.8** dizem respeito a dois ensaios experimentais realizados pela Petrobrás por Benjamim *et al.* (2004).

Mais recentemente, alguns autores começaram a considerar carregamentos combinados nestes ensaios, adicionando cargas de flexão e compressão. Os ensaios experimentais fornecem um banco de dados para a validação das análises numéricas e para o desenvolvimento de métodos analíticos semi-empíricos.



**Figura 3.7** - *Burst test* de duto com defeito de corrosão longo.  
Fonte: Benjamim *et al.* (2004)



**Figura 3.8** - Detalhe de duto com defeito de corrosão longo após a ruptura.  
Fonte: Benjamim *et al.* (2000)

### 3.3.1 Ensaios Experimentais Realizados por Choi *et al.* (2003)

Choi et al realizaram em 2003, uma série de ensaios experimentais em dutos, fabricados com aço tipo X65, com vários tipos de corrosões produzidas mecanicamente. Um duto com comprimento total de 12m foi dividido em peças de 2,3m de comprimento. Os dutos resultantes (espécimes) eram submetidos à pressão interna, gradualmente crescente, até que fosse atingida a ruptura. Cada espécime teve sua extremidade tampada e soldada para permitir elevada pressão interna. As geometrias da corrosão e do duto são as mesmas indicadas na **Figura 3.5**. Os sete espécimes ensaiados estão na **Tabela 3.1** com suas respectivas pressões de ruptura e com as dimensões do duto e da corrosão. O defeito de corrosão foi produzido mecanicamente em forma retangular, com os cantos arredondados para evitar alta concentração de tensões. Para que a variação das deformações havidas durante a pressurização pudesse ser avaliada, seis “strain gages” foram instalados em cada espécime. Todos os espécimes apresentaram deformação saliente ao redor do defeito, e a falha ocorreu na base do defeito na forma de uma fissura longitudinal. Os espécimes foram pressurizados gradativamente, sendo que, uma hora após o início dos ensaios, já se atingia 80% da pressão máxima. A pressurização se completava somente três horas depois.

**Tabela 3.1.** - Espécimes ensaiados por Choi *et al.* (2003)

ESPÉCIME	a (mm)	c (mm)	d (mm)	Pressão de Ruptura (Mpa)
<b>DA</b>	200	50	4,4 (25%)	24,11
<b>DB</b>	200	50	8,8 (50%)	21,76
<b>DC</b>	200	50	13,1 (75%)	17,15
<b>LA</b>	100	50	8,8 (50%)	24,30
<b>LC</b>	300	50	8,8 (50%)	19,80
<b>CB</b>	200	100	8,8 (50%)	23,42
<b>CC</b>	200	200	8,8 (50%)	22,64

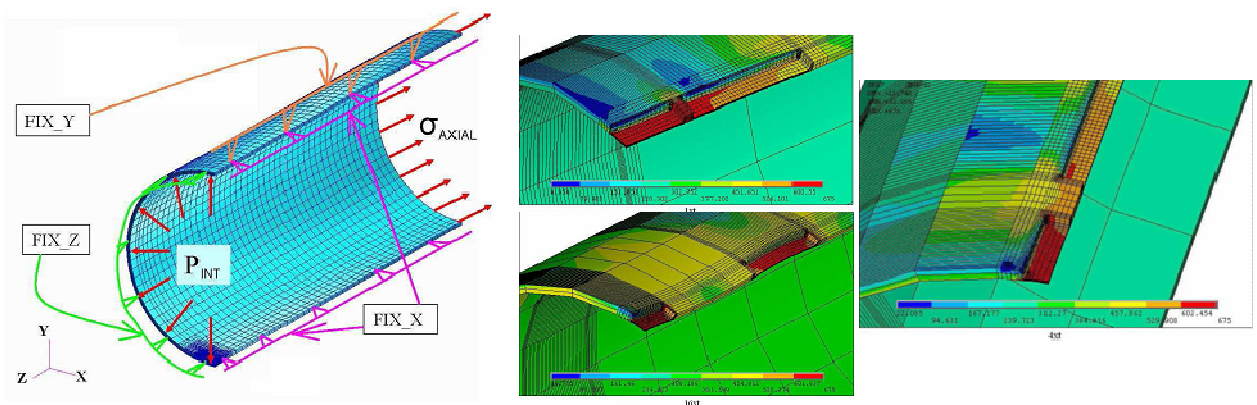
Dados gerais:  $L = 2300$  mm;  $D = 762$  mm;  $t = 17,5$  mm.

Fonte: Choi *et al.* (2003)

### 3.4 Métodos Numéricos

Lança-se mão dos métodos numéricos quando um problema é complexo demais para ser resolvido analiticamente. Nesse caso, a solução numérica poderá ser mais simples e precisa que a analítica. O método numérico mais difundido para o cálculo da resistência de dutos com defeito é o método dos elementos finitos. O método dos elementos finitos foi ferramenta fundamental para possibilitar a conclusão de diversos trabalhos relacionados com resistência de dutos corroídos, como por exemplo, os de: Roy et al.(1997), Stephens e Leis (2000), Smith et al.(1998), Wang et al.(1998), DNV (1999), Alves (2002), Diniz (2002), Choi et al.(2003), Costa (2004) e Cervelin (2007).

As figuras abaixo mostram as condições de contorno e alguns resultados de análise de elementos finitos, para ilustrar a aplicação do método dos elementos finitos em dutos com defeitos.



**Figura 3.9** – Condições de contorno e resultados de análise de elementos finitos

Fonte: Cervelin (2007)

Baseados nos resultados obtidos por análise de elementos finitos, Choi et al. (2003) propuseram uma fórmula para determinar a carga limite de dutos corroídos, feitos de aço X65. Com o intuito de obter o critério de falha para defeitos de corrosão, os pesquisadores, por elementos finitos, realizaram análises plásticas, tridimensionais, simulando seus próprios ensaios de ruptura, descritos em 3.2.1. Para tais análises, utilizou-se o programa comercial de elementos finitos ABAQUS. Considerando-se dois planos de simetria, somente um quarto do duto foi modelado. A corrosão, produzida mecanicamente foi simulada em forma retangular (ver a **Figura 3.10-a**), de acordo com os ensaios. O modelo foi concebido com elemento 3D

isoparamétrico de 20 nós, sendo o número total de elementos e nós 1129 e 5713, respectivamente.

Como o colapso, de acordo com as experiências, ocorre sempre na área do defeito, o mesmo foi modelado a partir de um número suficiente de elementos determinado por meio de uma análise prévia de convergência. A pressão hidrostática foi aplicada na superfície interna do modelo. Na extremidade do modelo foi aplicada uma força axial correspondendo à força resultante da pressão exercida nas tampas laterais dos espécimes. A curva tensão-deformação verdadeira foi obtida através dos resultados de ensaio de tração que foi realizado com o mesmo material dos espécimes. Em toda a análise de elementos finitos foi aplicada teoria de plasticidade incremental com grandes deformações, para simular a deformação local da área com defeito.

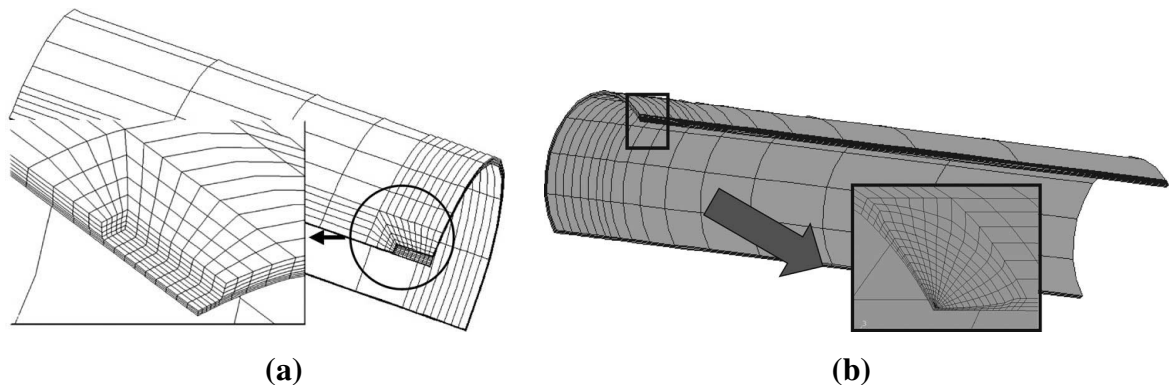
Os resultados da análise numérica, conjuntamente com os resultados experimentais, estão ordenados na **Tabela 3.2**. Como em todos os testes de carga, houve falha local na área com defeito, o critério de falha considerado é a tensão local nessa área. Os valores de tensão efetiva de Von Mises foram calculados para a área com defeito e foram comparados com os resultados experimentais.

**Tabela 3.2** – Resultados das análises numéricas de Choi et al. (2003)

ESPÉCIME	Pressão de Ruptura Experimental (Mpa)	$P_{AEF}/P_{ENSAIO}$				
		$\sigma_y$	$\sigma_{flow}$	$0,8\sigma_u$	$0,9\sigma_u$	$\sigma_u$
DA	24,11	0,81	0,98	0,99	1,01	1,01
DB	21,76	0,66	0,93	0,95	1,04	1,10
DC	17,15	0,42	0,84	0,86	0,95	1,05
LA	24,30	0,68	0,94	0,95	1,00	1,01
LC	19,80	0,61	0,86	0,88	0,98	1,06
CB	23,42	0,57	0,84	0,86	0,93	1,00
CC	22,64	0,59	0,85	0,88	0,95	1,02

O passo seguinte foi estabelecer o critério de falha de dutos com um ponto de corrosão de formato semi-elíptico. Esse formato é usado no lugar do retangular, para que se possa modelar um ponto de corrosão de forma mais geral e arbitrária, como é encontrado na prática. O formato retangular, utilizado nos espécimes, apresenta as condições mais severas, ou seja, é

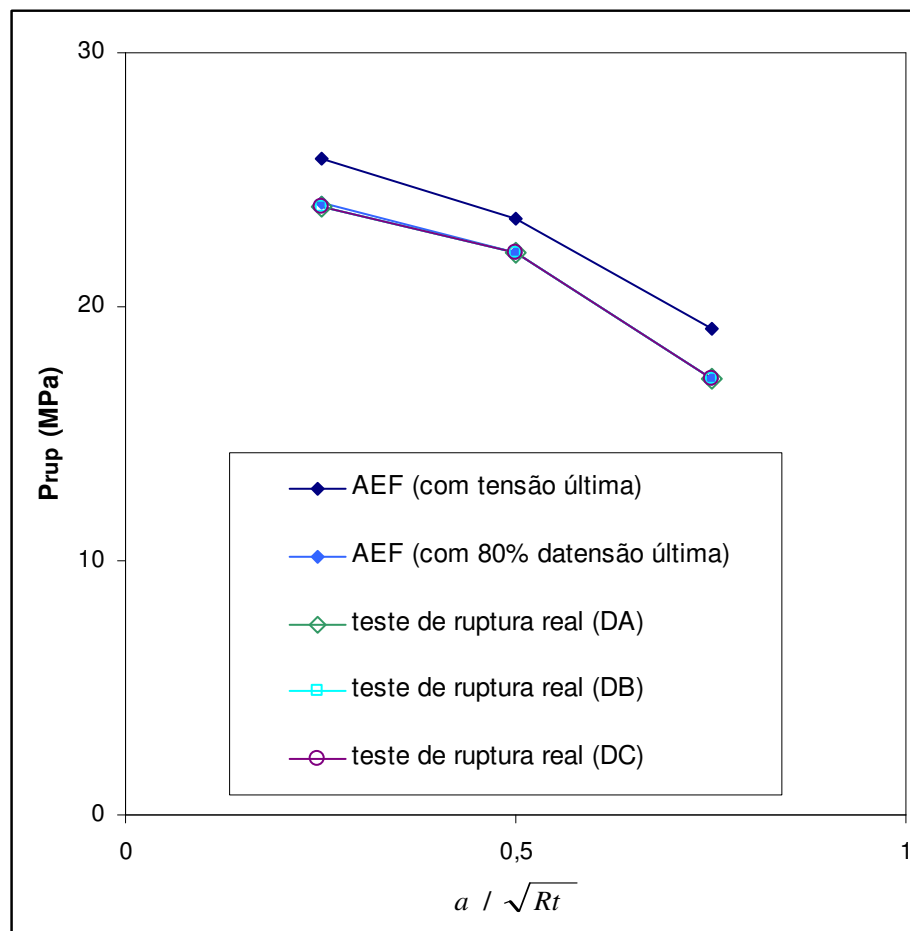
o pior caso, no qual a capacidade de carga do duto é a menor possível. Assim, o critério de falha encontrado para o caso de corrosão retangular ( $90\% \sigma_u$ ) deve ser modificado para o caso da corrosão semi-elíptica. Os modelos de elementos finitos com corrosão retangular foram então adaptados para os com corrosão semi-elíptica. Uma malha típica é mostrada na **Figura 3.10-b**.



**Figura 3.10** – (a) – corrosão retangular; (b) – corrosão semi-elíptica

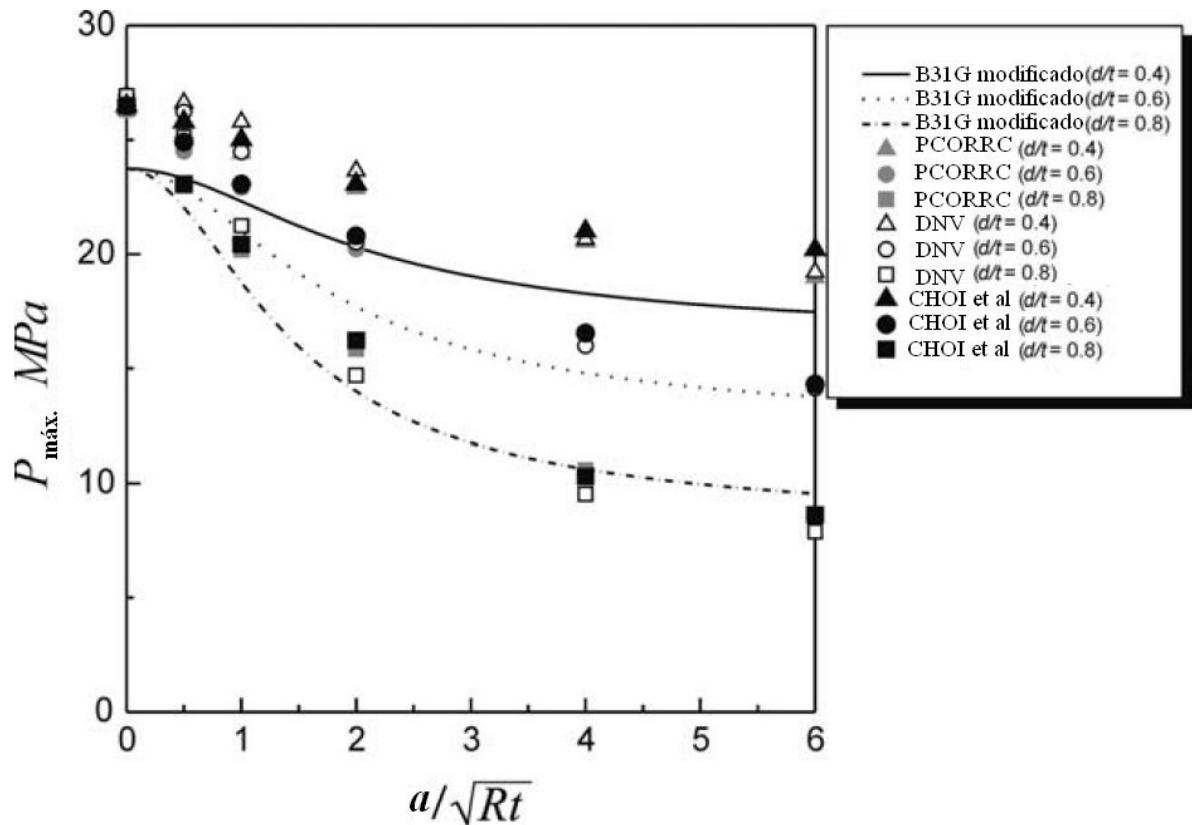
Fonte: Choi *et al.* (2003)

As análises de dutos, com essa nova configuração, foram desenvolvidas para os espécimes DA, DB e DC, pois foram os espécimes com resultados contra a segurança quando foi utilizada a malha retangular. A **Figura 3.11** mostra a comparação dos resultados numéricos com os experimentais. Como tensões de referência foram utilizadas  $\sigma_u$ , e  $0,8\sigma_u$ . Quando a tensão de Von Mises atinge  $\sigma_u$ , as pressões de ruptura são superestimadas em 10%. Por outro lado, ao se aplicar as pressões dos ensaios no modelo, a tensão de Von Mises atinge  $0,8\sigma_u$ . Dessa forma,  $0,8\sigma_u$ , torna-se a tensão de referência mais adequada para o modelo com corrosão semi-elíptica. Como era de se esperar, essa tensão é menor que aquela adotada para o modelo de corrosão retangular: para uma mesma pressão de ruptura de qualquer ensaio, atinge-se um valor menor de tensão no modelo de corrosão semi-elíptica. Ou seja, esse último possui maior capacidade de carga. Fica claro que a corrosão retangular é a mais severa, e adotando-se  $0,8\sigma_u$ , como critério de falha para dutos com corrosão em forma semi-elíptica, tem-se uma solução conservadora, a favor da segurança.



**Figura 3.11** – Comparação de  $P_{RUP}$  entre ensaios experimentais e AEF para elementos elípticos

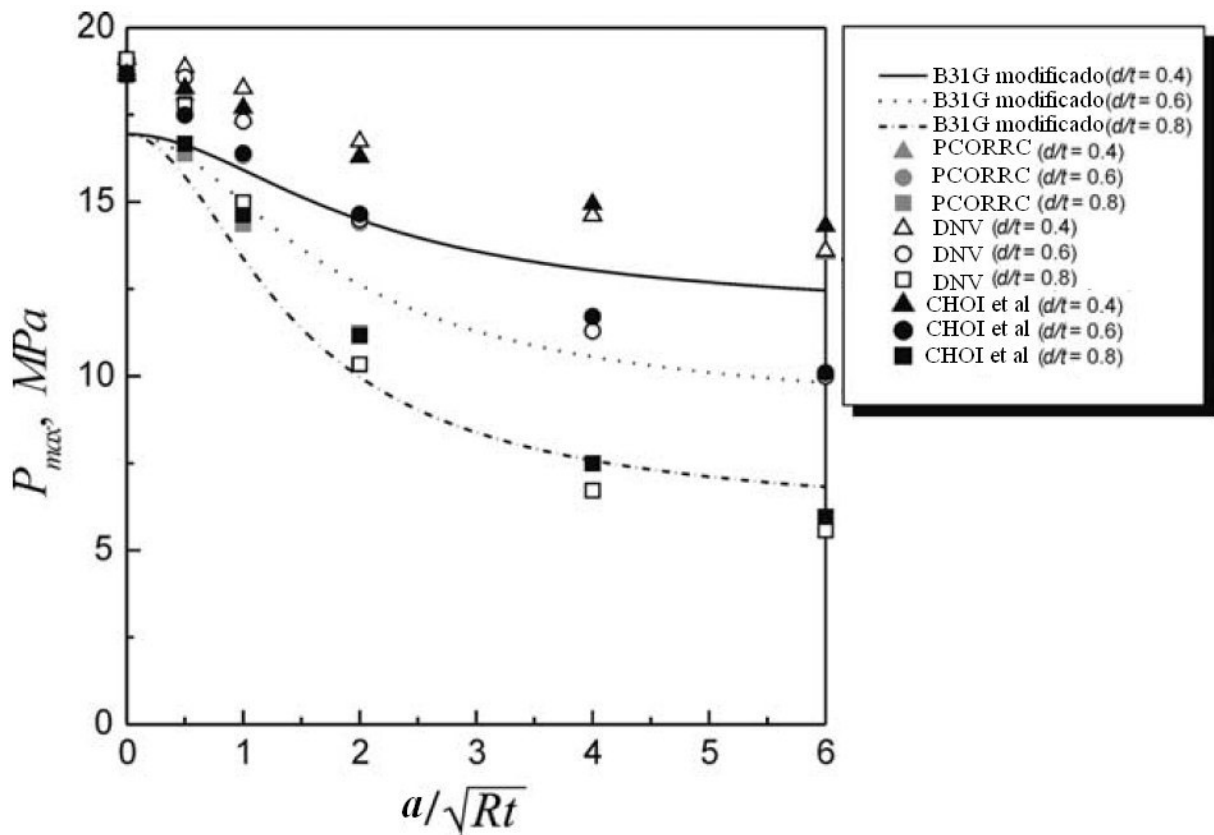
Utilizando-se esse critério, vários modelos, de mesmo material e elementos finitos já citados anteriormente foram executados, variando-se suas geometrias num total de 30 tipos de corrosões de formato semi-elíptico. Variaram-se três diferentes parâmetros:  $R/t$ ,  $d/t$  e  $a/\sqrt{Rt}$ . Os valores de  $R/t$  adotados foram 21,3 e 30, considerando-se as reais dimensões do gasoduto. Os valores de  $d/t$  foram definidos como 0,4, 0,6 e 0,8. Cinco valores de  $a/\sqrt{Rt}$ , variando de 0,5 até 6, foram considerados. Os 30 casos analisados estão resumidos na **Tabela 3.3**. A variação da largura,  $c$ , não seria significativa já que rupturas axiais são mais críticas que as circunferências, como observado nos ensaios, e assim sendo,  $c/\pi R$  foi fixado em 1/10 para todo o grupo de análise. Para todos os casos, a máxima tensão de Von Mises foi observada no ponto mais inferior do defeito. Assumiu-se, no entanto, que a falha ocorria quando a tensão de Von Mises, ao longo da parede do defeito, atingia  $0,8 \sigma_u$  como estabelecido anteriormente. A máxima pressão permitida,  $P_{máx}$ , era determinada como sendo a pressão interna para a qual o critério de falha era satisfeito.



**Figura 3.12** – Comparação de  $P_{máx}$  segundo os métodos B31G modificado, PCORRC, DNV e AEF ( $R/t = 21,3$ )

As **Figuras 3.12** e **3.13** mostram os resultados para as máximas pressões admissíveis, das análises numéricas, quando  $R/t = 21,3$  e  $30$ , respectivamente, em comparação com resultados de métodos empíricos, tais como B31G modificado, Battelle PCORRC e DNV. Quando  $R/t$  cresce, a pressão admissível máxima decresce. Para casos de  $d/t = 0,4$  e  $0,6$ , a AEF gera valores aproximadamente 10 a 20% maiores que os obtidos pelo método B31G modificado. Para defeitos profundos, com  $d/t = 0,8$ , os resultados da AEF vão apresentando valores menores que os do B31G modificado, na medida que o comprimento do defeito aumenta. Isto implica que o B31G modificado é conservador para todos os defeitos rasos, mas pode ser não-conservador para defeitos longos e profundos. Esta tendência se verifica também para os outros métodos.





**Figura 3.13** – Comparação de  $P_{\max}$  segundo os métodos B31G modificado, PCORRC, DNV e AEF ( $R/t = 30$ )

**Tabela 3.3** – Matriz das análises realizadas por Choi et al., totalizando 30 casos analisados

$c/\pi R_0$	$R/t$	$d/t$	$a / \sqrt{Rt}$	$R/t$	$d/t$	$a / \sqrt{Rt}$
0,1	21,3	0,4	0,5	30	0,4	0,5
			1			1
			2			2
			4			4
			6			6
		0,6	0,5	0,6	0,5	
			1		1	
			2		2	
			4		4	
			6		6	
		0,8	0,5	0,8	0,5	
			1		1	
			2		2	
			4		4	
			6		6	

Aplicando análise de regressão nos resultados de AEF, os pesquisadores propõem uma solução de carga limite como uma função de  $R/t$ ,  $d/t$  e  $a/\sqrt{Rt}$  como a seguir:

Para  $\frac{a}{\sqrt{Rt}} < 6$  (Defeito Curto)

$$P_f = 0,9 \cdot \frac{2t}{D} \sigma_u \left[ C_2 \left( \frac{a}{\sqrt{Rt}} \right)^2 + C_1 \left( \frac{a}{\sqrt{Rt}} \right) + C_0 \right] \quad (3.41)$$

$$C_2 = 0,1163 \left( \frac{d}{t} \right)^2 - 0,1053 \left( \frac{d}{t} \right) + 0,0292$$

$$C_1 = -0,6913 \left( \frac{d}{t} \right)^2 + 0,4548 \left( \frac{d}{t} \right) - 0,1447$$

$$C_0 = 0,06 \left( \frac{d}{t} \right)^2 - 0,1035 \left( \frac{d}{t} \right) + 1,0$$

Para  $\frac{a}{\sqrt{Rt}} \geq 6$  (Defeito Longo)

$$P_f = \frac{2t}{D} \sigma_u \left[ C_1 \left( \frac{a}{\sqrt{Rt}} \right) + C_0 \right] \quad (3.42)$$

$$C_1 = 0,0071 \left( \frac{d}{t} \right) - 0,0126$$

$$C_0 = -0,9847 \left( \frac{d}{t} \right) + 1,1101$$

No **Capítulo 6** do presente trabalho realiza-se um comparativo entre os métodos apresentados em relação a pressão de falha e índice de confiabilidade.

## 4 CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Este capítulo apresenta alguns conceitos fundamentais da teoria da confiabilidade estrutural. São abordados os aspectos mais relevantes que serviram de base para este trabalho.

São inúmeras as incertezas ligadas ao projeto e construção de qualquer estrutura. Thoft-Christensen e Baker (1986) enumeram três:

- a) Incerteza física: variabilidades inerentes ao carregamento, às propriedades dos materiais e às dimensões;
- b) Incerteza estatística: ligada a escolha apropriada do tipo de distribuição de probabilidade e a determinação numérica dos seus parâmetros, baseadas em uma amostra de dados de tamanho limitado;
- c) Incerteza do modelo: representa incertezas devido a simplificações, condições de contorno desconhecidas e efeito ignorado de outras variáveis.

Alguns autores ainda acrescentam uma quarta fonte de incerteza, proveniente do erro humano durante o projeto, construção e utilização de uma estrutura. Dessa forma, não é possível garantir segurança absoluta a uma estrutura, haja visto que é possível ocorrer uma determinada conjuntura ou somatória de efeitos que a leve a ruína (estado limite último) ou a não preencher seus requisitos como desejado (estado limite de utilização). Nesse contexto, a missão da engenharia é adotar um nível de segurança adequado tendo-se em vista as limitações financeiras existentes. A consideração das incertezas e a busca pela segurança “ideal” são objetivos da teoria da confiabilidade.

De acordo com Sagrilo (1994), o cálculo estrutural em engenharia tem como princípio básico assegurar o desempenho satisfatório da estrutura de acordo com as solicitações definidas no projeto, durante sua vida útil, de tal forma a obter um nível aceitável entre segurança e o custo do empreendimento.

Em geral, na prática, os problemas de engenharia não possuem valores quantitativos exatos para que se possa equacionar e resolver o problema de maneira direta e precisa. Neste âmbito a confiabilidade estrutural pode ser considerada como uma importante ferramenta que o engenheiro dispõe para quantificar a confiança que uma estrutura possui em atender aos objetivos para os quais a mesma fora projetada, considerando as incertezas nas variáveis inerentes ao projeto. E cada uma destas variáveis aleatórias está associada a uma distribuição de probabilidade qualquer.

## 4.1 Variáveis aleatórias

Segundo Ang e Tang (1975), na engenharia e ciências relacionadas com a física, muitos fenômenos aleatórios de interesse estão associados a resultados numéricos de alguma quantidade física. Em alguns casos, os resultados de um evento podem ser identificados através de valores de uma função, tais como valores de uma função de variáveis aleatórias, os quais geralmente são representados por letras maiúsculas. Em resumo, variável aleatória é uma função que associa um número real a um evento aleatório. Sendo  $X$  uma variável aleatória,  $(X=a)$  ou  $(X<b)$  pode ser a representação de eventos desta variável aleatória. A função distribuição de probabilidade de uma variável aleatória descreverá medidas de probabilidades associados aos valores das variáveis aleatórias.

Dada uma variável aleatória  $X$ , sua função densidade de probabilidade f.d.p. é indicada por  $f(x)$  e a probabilidade da variável aleatória situar-se no intervalo  $[a,b]$  é dada por:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx \quad (4.1)$$

Por definição uma função densidade de probabilidade possui as seguintes propriedades:

- $f_x \geq 0,0$  ;
- $\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) dx = 1,0$  ; (4.2)
- $\int_a^b f_X(x) dx = P(a \leq X \leq b)$ .

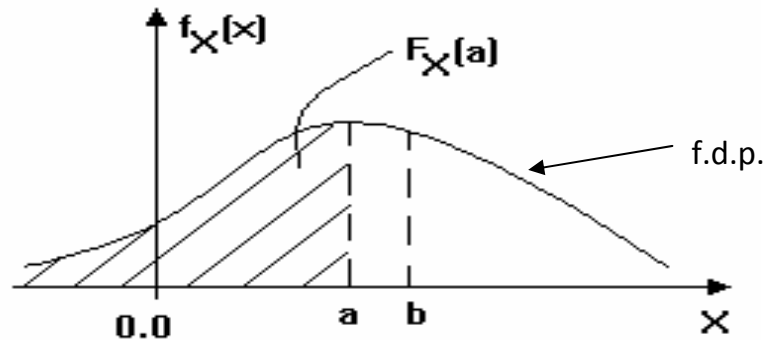
Se  $X$  é uma variável aleatória, a distribuição de probabilidade pode ser sempre descrita por sua função distribuição acumulada f.d.a., que pode ser indicada por:

$$F_x(a) = \int_{-\infty}^a f_x(x) dx \quad (4.3)$$

$F_x(a)$  indica a probabilidade da variável  $X$  assumir valores menores ou iguais a “ $a$ ”. A função de distribuição acumulada f.d.a., possui as seguintes propriedades:

- $F_x(-\infty) = 0,0$  ;
- $0 \leq F_x(x) \leq 1,0$ ; (4.4)
- $F_x(\infty) = 1,0$  .

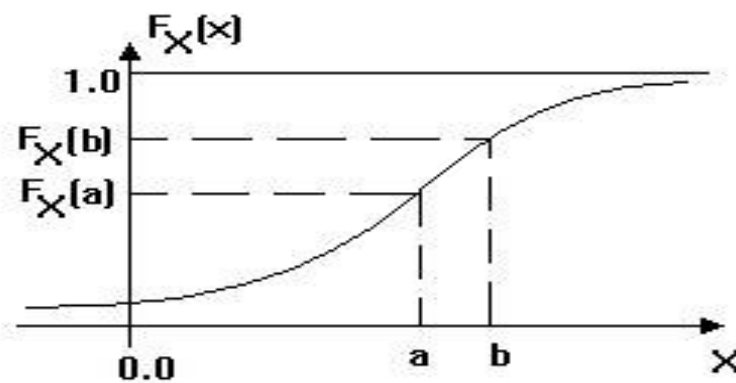
A função densidade de probabilidade de uma variável aleatória  $X$  pode ser representada graficamente pela **Figura 4.1** abaixo, no caso de  $X$  ser constitutiva.



**Figura 4.1** - função densidade de probabilidade (f.d.p.)

Da figura, observa-se que a área sombreada sob a f.d.p., representa o valor referente a função de distribuição acumulada (f.d.a.), o qual mostra a probabilidade da variável aleatória  $X$  de assumir valores menores ou iguais a “ $a$ ”.

A função de distribuição acumulada ( $F(x)$ ) pode ser indicada como na **Figura 4.2** adiante:



**Figura 4.2** - função de distribuição acumulada (f.d.a.)

Observa-se pela **Figura 4.2** que:

1. Para  $X = a$  tem-se  $F_X(a)$ ;
2. Para  $X = \infty$ ,  $F_X(\infty) = 1$ .

## 4.2 Características de uma variável aleatória

As características probabilísticas de uma variável aleatória seriam completamente descritas se a forma da f.d.p. e os parâmetros associados fossem plenamente identificados. Nem sempre é conhecida a forma que representa a função de distribuição de probabilidade de uma variável aleatória, de tal modo que certas aproximações são necessárias. Neste caso, esta variável aleatória pode ser descrita por valores médios e um valor de medida de dispersão destes valores.

Uma variável aleatória pode assumir valores que estão inseridos dentro de um conjunto. Dentre estes valores, o valor médio é de interesse especial.

Se  $X$  é uma variável aleatória discreta, tem-se a seguinte expressão para o valor esperado ou média de  $X$ :

$$\mu_x = E(X) = \sum_{x_i} x_i p_x(x_i) \quad (4.5)$$

Se  $X$  é uma variável aleatória contínua, sendo  $f_x(x)$  a função densidade de probabilidade, o valor médio é dado por:

$$\mu_x = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f_x(x) dx \quad (4.6)$$

Outro importante parâmetro da variável aleatória é a medida de dispersão ou variância. Na teoria da probabilidade, a variância de uma variável aleatória é uma medida de sua dispersão estatística, indicando quão longe em geral os seus valores se encontram do valor esperado ou valor médio. A variância é dada por:

$$VAR(x) = E\left[(X - \mu_x)^2\right] \quad (4.7)$$

Expandindo o integrando obtém-se:

$$VAR(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_x)^2 f_x(x) dx \quad (4.8)$$

A unidade de variância é o quadrado da unidade de observação. Isto é inconveniente e levou a se usar a raiz quadrada da variância, que tem a mesma unidade de medida dos dados, isto é o desvio padrão. Assim o desvio padrão é dado por:

$$\sigma_x = \sqrt{VAR(X)} \quad (4.9)$$

Somente com a variância e o desvio padrão é difícil mensurar se a dispersão é grande ou pequena. O indicativo desta amplitude é dado pelo coeficiente de variação (CV), dado pela seguinte relação:

$$CV = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (4.10)$$

### 4.3 Distribuições Usuais de Probabilidades

Para descrição do formato dos contradomínios das variáveis aleatórias são utilizadas as distribuições de probabilidade. Através de análise e pesquisa de dados históricos de fenômenos físicos, algumas funções tiveram sucesso em representar tais fenômenos e são largamente utilizados na engenharia. Neste item apresentam-se as principais distribuições de probabilidade utilizadas neste trabalho.

Essas distribuições são do tipo normal ou Gaussiana, log-normal, Exponencial, Rayleigh, Gumbel, Weibull, Máximos Extremos entre outras. Neste item apresentam-se as distribuições de probabilidade que foram utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

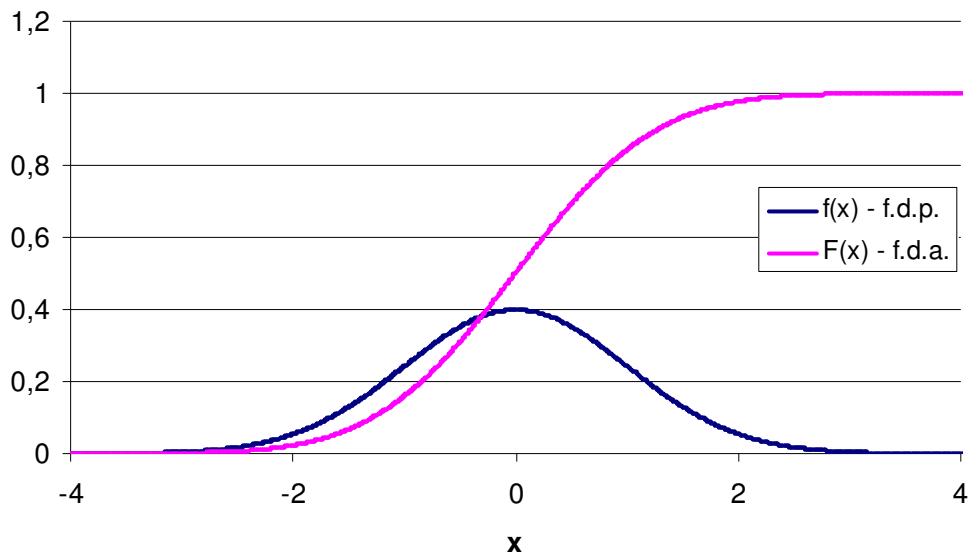
#### 4.3.1 Distribuição Normal ou Gaussiana

A distribuição normal é uma das mais importantes distribuições de probabilidade. É conhecida, também, como distribuição de Gauss ou Gaussiana. É uma das distribuições mais conhecidas e aplicadas para representar uma variedade de fenômenos. É inteiramente descrita pelos seus parâmetros média e desvio padrão, ou seja, conhecendo-os se consegue calcular qualquer probabilidade em uma distribuição normal.

A função densidade de probabilidade desta distribuição é dada por:

$$f_x = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right) \quad \text{para } -\infty < x < \infty \quad (4.11)$$

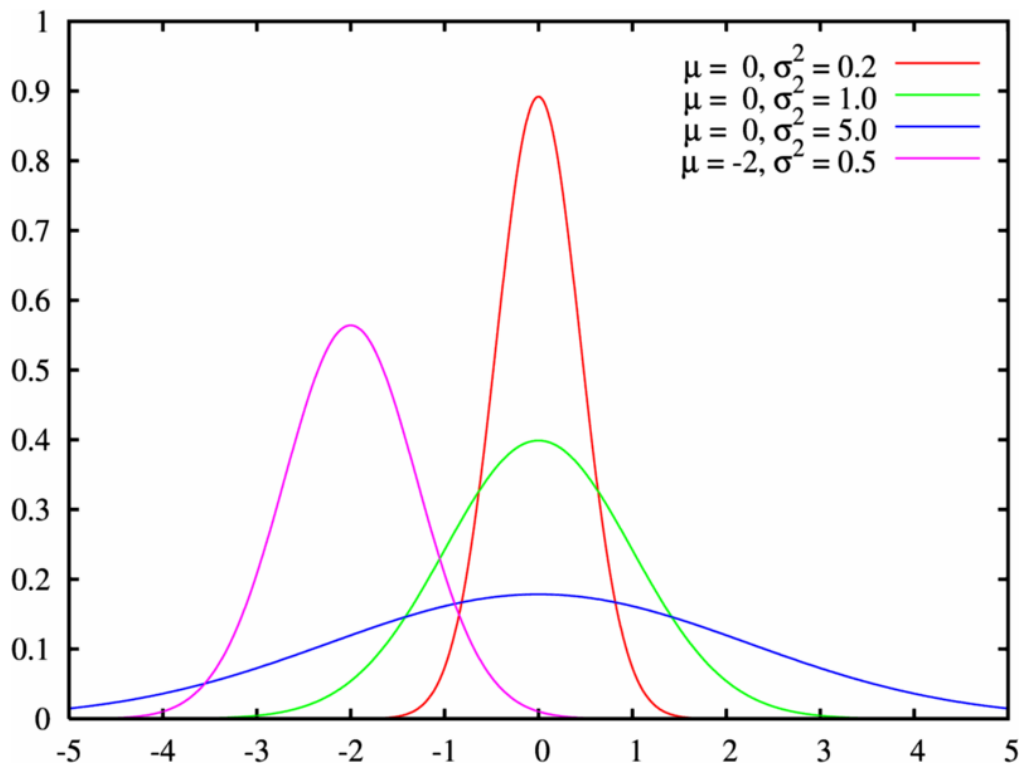
Onde  $\sigma_x$  e  $\mu_x$  são os parâmetros desvio padrão e média, respectivamente da f.d.p. . Uma notação resumida desta distribuição é  $N(\mu, \sigma)$ . A distribuição normal é simétrica em relação à média.



**Figura 4.3** -  $f(x)$  – f.d.p. normal e  $F(x)$  – f.d.a. normal

A **Figura 4.3** apresenta a forma da função densidade de probabilidade normal  $f(x)$  e sua função de distribuição acumulada  $F(x)$ , para quando a média é nula e o desvio padrão unitário,  $N(0,1)$ .

A **Figura 4.4** mostra quatro funções de densidade de probabilidade normal com diferentes médias e desvios padrões. Quanto mais dilatada é a base da f.d.p. maior é a dispersão com relação à média, ou seja, maior é o desvio padrão.



**Figura 4.4:** funções de densidade de probabilidade normais para quatro diferentes conjuntos de parâmetros.



### 4.3.2 Distribuição Normal Padronizada

Essa distribuição é uma particularidade da função distribuição de probabilidade normal, o qual apresenta média zero e desvio padrão igual a 1. É denotada como  $N(0,1)$ . A equação da f.d.p. é:

$$f_x(x) = \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) \quad \text{para } -\infty < x < \infty \quad (4.12)$$

A função densidade  $f_x$  da **Figura 4.3** é uma função de distribuição normal padronizada. Note que essa função é simétrica em relação ao zero, que representa sua média. Devido a grande utilização desta distribuição definiu-se uma notação especial para representar a função distribuição de probabilidade, que é  $\varphi(x)$  e a função de distribuição acumulada, que é  $\Phi(x)$ , e representada pela **equação (4.13)** abaixo:

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x f_x(x) dx \quad (4.13)$$

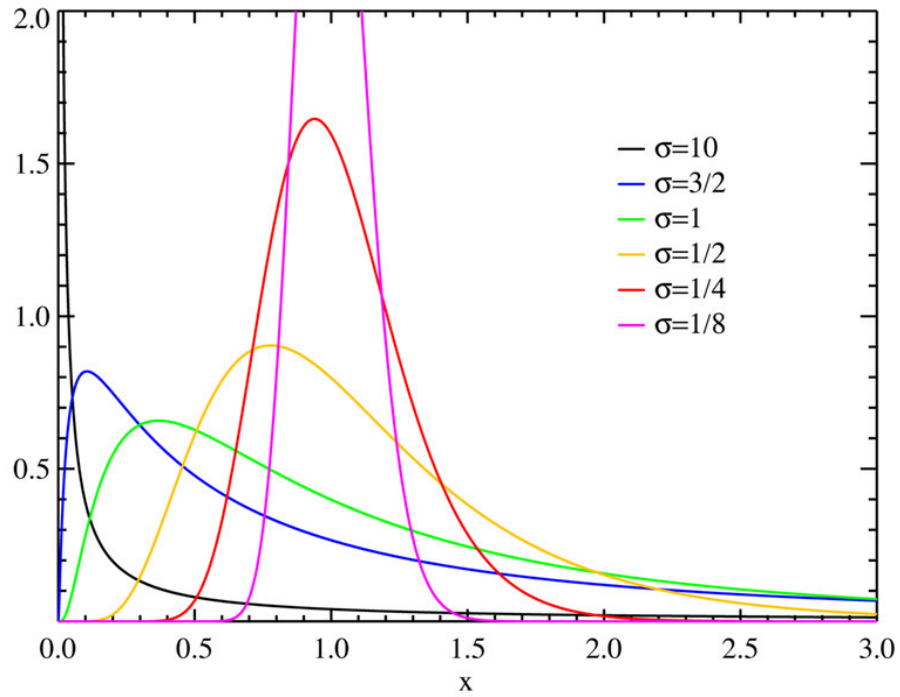
Devido a grande aplicabilidade da função distribuição normal padronizada, foi construída uma tabela dos valores de  $\Phi(y)$  para  $y \geq 0$ .

### 4.3.3 Distribuição Log-normal

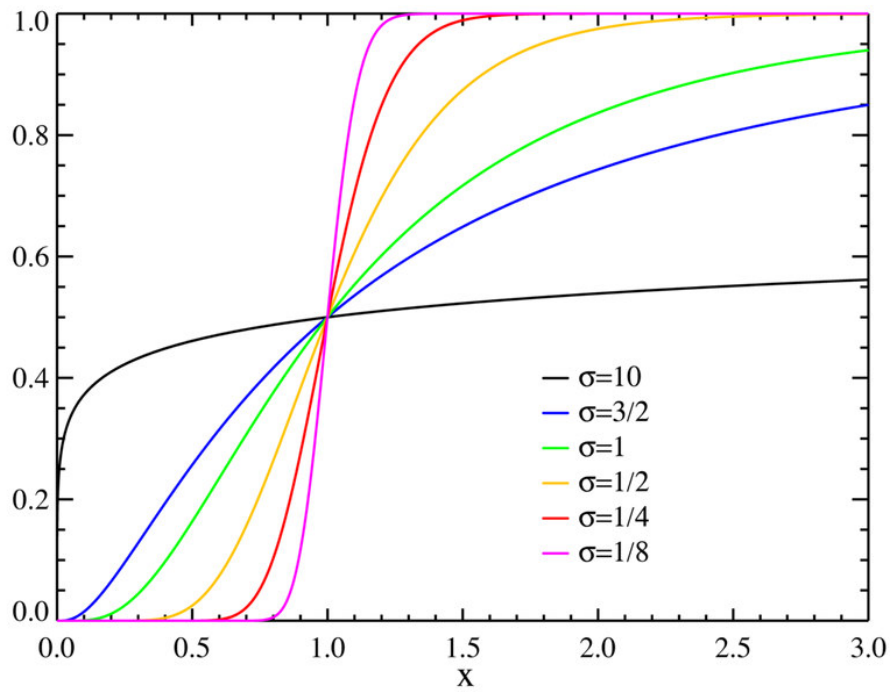
Uma variável  $X$  tem uma distribuição log-normal se  $Y=\ln(x)$  é normal. A f.d.p. para essa distribuição é apresentada a seguir:

$$f_x = \frac{1}{x \cdot \sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right) \quad \text{para } 0 < x < \infty \quad (4.14)$$

A **Figura 4.5** apresenta a função densidade de probabilidade com distribuição lognormal para diferentes desvios padrões e média nula, bem como a **Figura 4.6** representa a função de distribuição acumulada log-normal. Percebe-se que a f.d.p. admite valores somente para  $X > 0$ , ou seja, somente valores positivos, conforme se observa nas figuras.



**Figura 4.5** - f.d.p. Log-normal para média nula e diferentes valores de desvio padrão



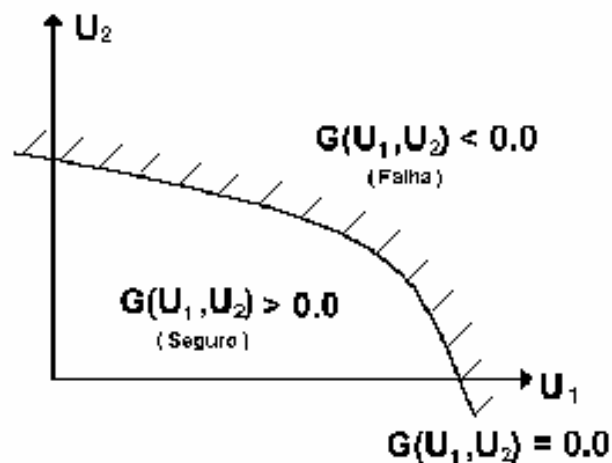
**Figura 4.6** - f.d.a. Log-normal para média nula e diferentes valores de desvio padrão

## 4.4 Confiabilidade de elementos estruturais

A confiabilidade de estruturas ou sistemas de engenharia pode ser entendida como sendo a capacidade de resistência da estrutura durante sua vida útil em relação à solicitação imposta à mesma.

Comumente a avaliação da confiabilidade de sistemas de engenharia é obtida através do uso de fatores de segurança e suposições conservadoras adotadas no projeto. Procura-se adequar a resistência mínima da estrutura com a solicitação máxima. Estas dificuldades são inerentes em sistemas de engenharia por causa da falta de informações completas.

A análise de confiabilidade estrutural é baseada na existência de uma função de falha ou função de estado limite  $G(U)$ , sendo que  $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$  representa o conjunto de variáveis aleatórias envolvidas na análise, ou seja todas aquelas com alguma informação estatística ao seu respeito. A função de falha  $G(U)$  deve ser definida de maneira que o limite  $G(U)=0$  separe o domínio de falha ( $G(U)<0$ ) e o domínio seguro ( $G(U)>0$ ) como é mostrado na **Figura 4.7**.



**Figura 4.7** – Definição da função de falha

Dessa forma, a confiabilidade estrutural medirá qual a possibilidade da ocorrência de falhas, ou seja, qual a probabilidade da função de falha assumir valores pertencentes ao domínio de falha. Esta probabilidade é chamada de probabilidade de falha e é definida por:

$$Pr_f = P[G(U) \leq 0] \quad (4.15)$$

Sabendo-se que  $f_u(U)$  representa a função densidade de probabilidade conjunta de todas as variáveis  $U$  envolvidas na análise, a probabilidade de falha pode ser descrita como:

$$\Pr_f = \int_{\Omega_f} f_u(U) du \quad (4.16)$$

De maneira geral é possível definir a função de falha  $G(U)$ , como sendo:

$$G(U) = Z = R - S \quad (4.17)$$

onde:

$R$  – representa a variável aleatória de resistência;

$S$  – representa a variável aleatória de sollicitação.

No caso de dutos com defeitos, a variável aleatória de resistência pode ser definida por um dos métodos semi-empíricos descritos no Capítulo 3. Enquanto a sollicitação é a pressão de operação do duto.

Considerando que as f.d.p.'s e f.d.a.'s de  $R$  e  $S$  sejam conhecidas, então as probabilidades associadas aos eventos citados podem ser definidas da seguinte forma:

$$\Pr_f = P(R < S) = P(G(U) \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f_u(u) du = F_U(0) \quad (4.18)$$

Assumindo-se que  $R$  e  $S$  são estatisticamente independentes, para  $R$  e  $S$  contínuos, a probabilidade de falha ( $\Pr_f$ ) pode ser representada como:

$$\Pr_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^s f_R(r) \cdot f_S(s) dr ds = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) \cdot f_S(s) ds \quad (4.19)$$

onde:

$f_r(r)$  : função densidade de probabilidade da variável  $R$ , resistência;

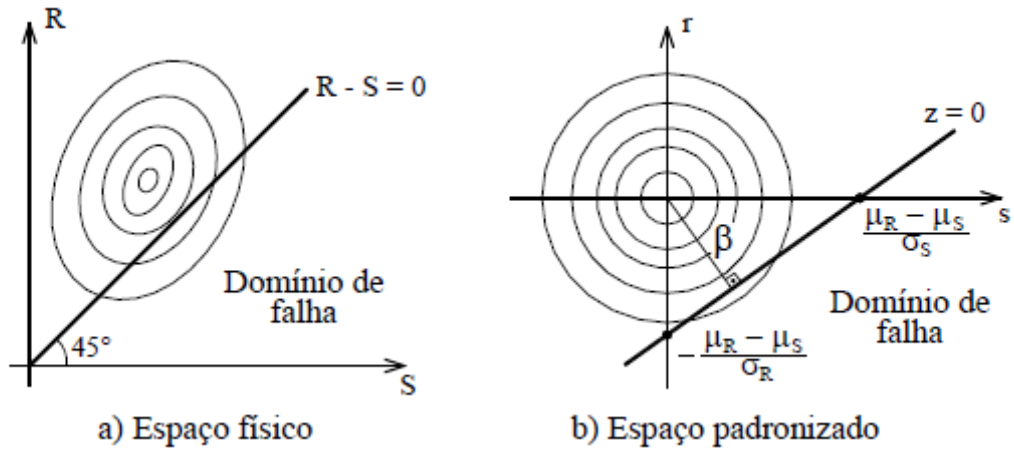
$f_s(s)$  : função densidade de probabilidade da variável  $S$ , sollicitação;

$F_R(s)$  : função distribuição acumulada da variável  $R$ , resistência.

Confiabilidade é definida como a probabilidade que  $R$  seja maior que  $S$ , ou seja,  $1 - \Pr_f$ . No entanto, o grande número de variáveis aleatórias envolvidas em muitos problemas práticos torna bastante difícil a obtenção da função conjunta de densidade de probabilidade e a integração da **equação (4.19)** é quase sempre inviável. Alternativamente, mede-se a segurança estrutural em função do índice de confiabilidade  $\beta$ , definido como a menor distância da origem do espaço das variáveis padronizadas ou variáveis reduzidas, até a superfície de falha, conforme pode ser visto na **Figura 4.8**. No caso de duas variáveis apenas ( $Z = R - S$ ), a superfície de falha é a linha correspondente a  $z(r,s) = 0$ , onde  $r$  e  $s$  correspondem às variáveis padronizadas ou variáveis reduzidas dadas por:

$$r = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (4.20)$$

$$s = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \quad (4.21)$$



**Figura 4.8** – Definição do índice de confiabilidade.

Se  $R$  e  $S$  seguem distribuições de probabilidade normais independentes, o índice de confiabilidade se relaciona diretamente com a probabilidade de falha na forma:

$$\Pr_f = \Phi \left[ -\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \right] = \Phi \left[ -\frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \right] = \Phi[-\beta] \quad (4.22)$$

e

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (4.23)$$

onde:

$\Phi$  : distribuição normal padronizada;

$\mu$  : representa a média das respectivas variáveis;

$\sigma$  : representa o desvio-padrão das respectivas variáveis.

## 5 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Este capítulo apresenta alguns métodos para o cálculo da confiabilidade estrutural. Serão abordados os métodos de análise mais comuns e será aprofundada a análise no método analítico FORM que é o principal método desenvolvido neste trabalho.

A preocupação com a segurança estrutural sempre esteve presente nos projetos de engenharia. A fim de avaliar as incertezas inerentes ao projeto, ao longo dos anos os métodos de análise de confiabilidade foram se desenvolvendo desde modelos práticos de engenharia até modelos sofisticados de matemática e estatística. Portanto segundo Sagrilo (1994) dependendo da quantidade de informações disponíveis, os métodos de análise de confiabilidade estrutural podem ser classificados em 4 níveis.

O nível 1 envolve os modelos que usam somente um valor característico de cada variável envolvida na análise. Neste nível a segurança é representada por fatores de segurança para as cargas e resistências.

No nível 2 são representados os métodos que usam duas grandezas para representar cada variável da análise, geralmente estas grandezas são a média e o desvio padrão. Neste nível a segurança é medida pelo índice de confiabilidade de segunda ordem.

O nível 3 é formado por métodos que consideram as distribuições de probabilidade características do projeto. Neste nível a segurança é representada pela probabilidade de falha.

O nível 4 é integrado por métodos que levam em conta aspectos de engenharia econômica juntamente com a análise de segurança da estrutura.

Segundo o manual de recomendações DNV(1991), de acordo com a variedade de medidas de confiabilidade estrutural, a probabilidade de falha não deve ser encarada como uma propriedade física da estrutura, mas sim uma medida de segurança devido a uma certa quantidade de informações e um certo método de análise.

## 5.1 Métodos para a Avaliação da Probabilidade de Falha

A solução analítica da **equação (4.19)** existe somente para um limitado número de casos acadêmicos. Devido a isso foram desenvolvidos métodos para resolver essa integral utilizando técnicas matemáticas e numéricas. Estes métodos em geral podem ser classificados em quatro categorias:

- Métodos de Integração Numérica;
- Métodos de Simulação de Monte Carlo;
- Métodos analíticos FORM e SORM;
- Métodos mistos ou Híbridos.

A seguir estes métodos serão ilustrados individualmente, porém uma maior ênfase será dada ao método analítico FORM (*First Order Reliability Method*), por ser o método utilizado neste trabalho.

### 5.1.1 Integração Numérica

Nesta metodologia, o domínio multidimensional da integral da **equação (4.19)** é subdividido em pequenos volumes  $\Delta u^i$  e a probabilidade de falha é calculada pela contribuição de todos aqueles pequenos volumes que pertencem à região de falha.

$$\Pr_f = \sum_{\Delta u^i \in F} f_u(u^i) \Delta u \quad (5.1)$$

Como esta técnica depende do conhecimento da superfície de falha, ela pode ser aplicada tanto para componentes como para sistemas.

Segundo Sagrilo (1994), por se tratar de uma integral multidimensional, onde pode existir um grande número de variáveis randômicas envolvidas na análise, a avaliação numérica da solução desta integral se constitui em um grande desafio matemático computacional. Além disso, na análise de confiabilidade estrutural a probabilidade de falha é geralmente pequena, portanto exigindo um elevado grau de precisão na avaliação numérica desta integral. Por causa destes limitantes, o uso desta metodologia tem sido restrito a problemas com pequeno número de variáveis.

### 5.1.2 Simulação de Monte Carlo

O método de Monte Carlo consiste em uma técnica de simulação onde se realiza inúmeras simulações com o intuito de se obterem pontos que simulem as variáveis aleatórias no espaço normal padrão. As repetições fornecem um conjunto de soluções, uma para cada realização, que representa a saída simulada do sistema. O objetivo é contar quantas vezes um ponto gerado aleatoriamente se encontra na região de falha dentro do total de simulações.

Sendo uma técnica de amostragem, o método está sujeito aos problemas relativos a erros de amostragem. Normalmente, requerem-se amostras de tamanho elevado para que um conjunto de simulações apresente resultados que descrevam um fenômeno com boa precisão.

Supondo a geração de variáveis através de geradores aleatórios, o conhecimento da variável  $U$ , permite o cálculo da função de falha, obtendo-se o valor de  $G(U)$ , dado pela **equação (4.17)**. Se  $G(U)$  for maior que 0, significa que o critério de segurança foi satisfeito. Caso contrário, se  $G(U)$  for menor que 0, a combinação de valores de  $U$  levou a falha no sistema.

A idéia do método de Monte Carlo é substituir a integração numérica por um estimador da probabilidade de falha. Isso é feito calculando-se a expectância matemática da variável aleatória  $I(u)$ , definida por:

$$P_{rf} = \int_{\Omega_F} f_{u_i}(u_i) du = \int_{\mathfrak{R}^n} I(u_i) f_{u_i}(u_i) du = E[I(U)] \quad (5.2)$$

O estimador  $I(u)$  é definido por:

$$I(u) = \begin{cases} 1 & \text{se } u \in \Omega_F \\ 0 & \text{se } u \notin \Omega_F \end{cases} \quad (5.3)$$

onde,  $\Omega_F$  é o domínio de falha do problema analisado.

Repetindo as análises para um grande número de simulações, a média empírica dos valores  $I(U)$  é um estimador da probabilidade de falha. Sendo  $n_S$  o número de simulações realizadas, tem-se que:



$$P_{rf} = \frac{1}{n_S} \sum_{i=1}^{n_S} I(u_i) \quad (5.4)$$

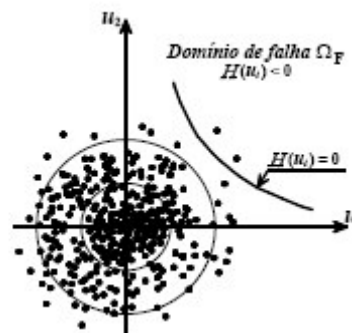
A variância do estimador é dada por:

$$\text{VAR}(I(u)) = \sigma_{I(u)}^2 = \frac{1}{n_S^2} \left[ n \sum_{i=1}^{n_S} I^2(u_i) - \left( \sum_{i=1}^{n_S} I(u_i) \right)^2 \right] \quad (5.5)$$

A grande vantagem deste método é que ele dispensa a necessidade de derivar a função de estado limite.

O método faz uso de um gerador de números aleatórios, que gera um número com distribuição uniforme, geralmente entre 0 e 1. Estes números são transformados nas mais variadas distribuições estatísticas através de sua função cumulativa. Portanto, qualquer função densidade de probabilidade pode ser obtida a partir de uma variável uniforme, desde que sua função cumulativa possa ser encontrada analiticamente.

Graficamente visualiza-se que as simulações efetuadas possuem resultados em todo o domínio do problema e os pontos que se encontram no domínio de falha fornecem uma aproximação da probabilidade relativa dessa região conforme a Figura 5.1, a seguir:



**Figura 5.1** – Exemplo de resultados de uma simulações de Monte Carlo

O alto custo computacional do método de Monte Carlo pode ser verificado ao se ter consciência de que a probabilidade de falha de elementos estruturais é muito pequena, sendo algumas vezes igual a valores muito próximos de zero.

### 5.1.3 Métodos Analíticos FORM e SORM

Os métodos analíticos FORM (*First Order Reliability Method*) e SORM (*Second Order Reliability Method*) são métodos que possibilitam o cálculo da probabilidade de falha através de transformações nas variáveis aleatórias que definem o problema, de modo a evitar a integração numérica.

Nessa metodologia, as variáveis aleatórias são transformadas em variáveis normais padrão, estatisticamente independentes, e a função de falha é escrita no espaço reduzido, representado pelas variáveis transformadas ou variáveis reduzidas.

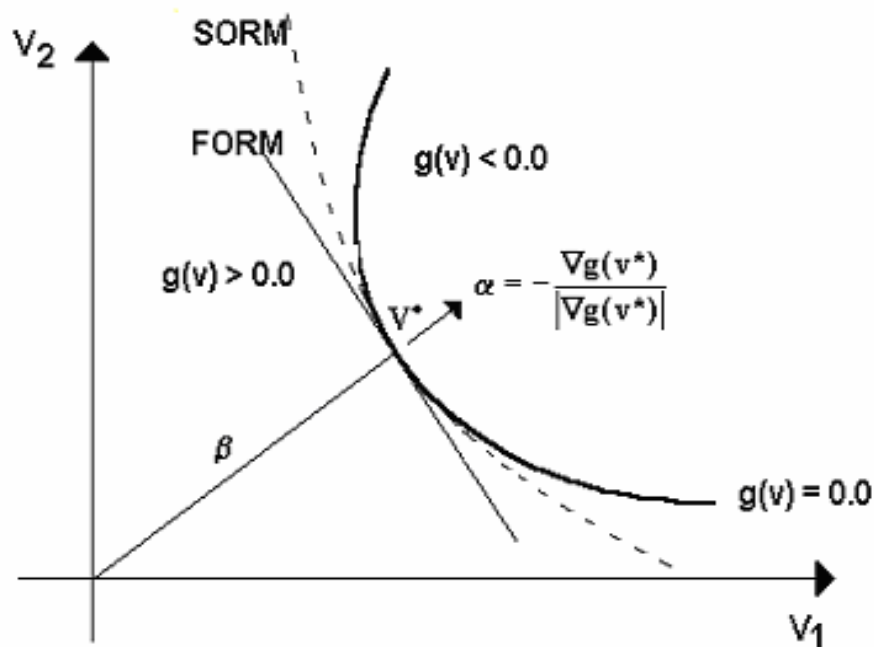


Figura 5.2 – Função de falha pelos métodos FORM e SORM

#### 5.1.3.1 FORM (First Order Reliability Method)

A função de estado limite é substituída por um hiper-plano tangente a ela no ponto de projeto. A probabilidade de falha é dada por :

$$\text{Pr}_f = \Phi(-\beta) \quad (5.6)$$

No caso de funções lineares de estado limite e variáveis normais e não correlacionadas, o resultado é exato. Em se tratando de funções não-lineares, a aproximação depende da curvatura da função na vizinhança do ponto de projeto.

O método FORM será tratado de maneira mais aprofundada no item 5.2, ilustrando todos os conceitos teóricos envolvidos para desenvolver o exemplo no capítulo 6.

### 5.1.3.2 SORM (Second Order Reliability Method)

A função de estado limite é aproximada por uma hiper-superfície de grau 2, que concorda com sua curvatura no ponto de projeto. Normalmente esse procedimento produz uma melhor representação das regiões seguras e das regiões de falha e, portanto, pode resultar em melhores aproximações das probabilidades de falhas.

## 5.1.4 Métodos Mistos ou Híbridos

O cálculo da probabilidade de falha pelos métodos de simulação de Monte Carlo exige um grande número de avaliações da função de falha. Uma maneira de diminuir este número de análises é a combinação dos métodos de análise de confiabilidade.

Segundo Sagrilo (1994), podem ser citados dois métodos adaptativos desenvolvidos por Karamchandani(1990) para técnicas de simulação. Estes métodos são chamados de Método de Amostragem por Importância Adaptativo e Método da Expectativa Condicional Híbrido Adaptativo. Ambos os métodos usam os resultados do método FORM para localizar os pontos de máxima densidade local de probabilidade e depois disso são desenvolvidas técnicas de simulação que levam em conta estas informações para diminuir o número de avaliações da função de falha.

## 5.2 Método Analítico FORM

No método FORM, as variáveis aleatórias  $U$ , correlacionadas ou não, são transformadas em variáveis normais padrão, estatisticamente independentes, também conhecidas como variáveis reduzidas e representadas por  $V$ . Definindo assim uma função de falha  $g(V)$  no espaço reduzido. A superfície de falha ( $g(V) = 0$ ) é aproximada por uma superfície, ou hiperplano, no ponto de maior densidade local de probabilidade, que corresponde ao ponto mais próximo a origem ( $V^*$ ). Este ponto é chamado de ponto de projeto ou ponto mais provável de falha, e a distancia entre o ponto  $V^*$  e a origem é chamada de índice de confiabilidade  $\beta$ , como pode ser visto na **Figura 5.2**, e é definido por:

$$\beta = |V^*| \quad (5.7)$$

Segundo Madsen (1986), utilizando as propriedades de distribuição normal multidimensional padrão, a probabilidade de falha pode ser definida por:

$$\Pr_f = \int_F f_u(U) du = \int_F f_v(V) dv = \Phi(-\beta) \quad (5.8)$$

onde  $\Phi(\cdot)$  representa a distribuição acumulada (f.d.a.) normal padrão.

O índice de confiabilidade  $\beta$  se relaciona com o ponto de projeto  $V^*$  pela seguinte expressão:

$$V^* = -\alpha^* \cdot \beta \quad (5.9)$$

onde  $\alpha^*$  é o gradiente da superfície de falha no ponto  $V^*$ , dado por:

$$\alpha = -\frac{\nabla g(v^*)}{|\nabla g(v^*)|} \quad (5.10)$$

Na **Figura 5.2** pode-se observar a representação gráfica do método FORM.

Portanto os principais desafios do método FORM são a transformação das variáveis aleatórias do espaço original para o espaço reduzido e, então, encontrar o ponto sobre a superfície de falha mais próximo da origem.

## 5.2.1 Transformação de Variáveis

A transformação de variáveis aleatórias em variáveis normais padrão estatisticamente independentes, conhecidas como variáveis reduzidas, é definida da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V &= T(U) \\ U &= T^{-1}(V) \end{aligned} \quad (5.11)$$

onde  $T$  é chamada de transformação de probabilidade e apresenta como condição necessária para sua existência o fato das variáveis aleatórias apresentarem distribuições contínuas de probabilidade.

Quando as variáveis são estatisticamente independentes esta transformação é simplesmente calculada para cada uma das variáveis, da seguinte maneira:

$$V_i = \Phi^{-1}[Fu_i(U_i)] \quad (5.12)$$

onde  $Fu_i(\cdot)$  é a função cumulativa de probabilidade original da variável  $U_i$ ,  $\Phi$  a função distribuição acumulada da normal padrão e  $V_i$  é a variável reduzida.

Considerando as variáveis aleatórias como sendo todas normais, correlacionadas ou não, torna-se possível utilizar a transformação de Nataf (Kiureghian e Liu, 1986), definida por:

$$V = \Gamma \cdot \sigma^{-1}(U - m) \quad (5.13)$$

Onde:

$m$  - vetor que contém as médias das variáveis aleatórias  $U$ ;

$\sigma$  - matriz diagonal que apresenta os desvios padrão destas variáveis;

$\Gamma$  - inversa da matriz  $L$ .

Para um problema onde as variáveis são estatisticamente independentes, ou seja correlação nula, pode-se então assumir que a matriz  $\Gamma$  é a matriz identidade.

Porém quando existe correlação entre as variáveis, o sistema não é estatisticamente independente e  $L$  representa a matriz triangular inferior obtida da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlação das variáveis aleatórias  $U$ , e apresenta-se da seguinte forma:

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1} & L_{n2} & L_{n3} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

O Jacobiano da transformação ( $J$ ) é definido por:

$$J = \frac{\partial V}{\partial U} = \Gamma \sigma^{-1} \quad (5.15)$$

No caso geral, onde as variáveis básicas podem apresentar distribuições de probabilidade quaisquer, correlacionadas ou não, o uso da transformação de Nataf torna-se possível, desde que cada distribuição de probabilidade não normal seja substituída por uma distribuição de probabilidade normal equivalente. Para tal utiliza-se o Princípio da Aproximação de Extremidade Normal apresentado por Ditlevsen (1981). Isso é obtido quando se faz a equivalência entre os valores das funções densidade acumulada e densidade de probabilidade no ponto de interesse  $U_i^*$ , ou seja:

$$\Phi\left(\frac{U_i^* - \mu_{ui}^N}{\sigma_{ui}^N}\right) = F_{ui}(U_i^*) \quad (5.16)$$

$$\frac{1}{\sigma_{ui}^N} \varphi\left(\frac{U_i^* - \mu_{ui}^N}{\sigma_{ui}^N}\right) = f_{ui}(U_i^*) \quad (5.17)$$

$\mu_{ui}^N$ ,  $\sigma_{ui}^N$  - valor médio e o desvio padrão de uma distribuição normal equivalente para  $U_i^*$  respectivamente;

$F_{ui}(U_i^*)$  - f.d.a. original de  $U_i$ , avaliada em  $u_i^*$ ;

$f_{ui}(U_i^*)$  - f.d.p. original de  $U_i$ , avaliada em  $u_i^*$ ;

$\Phi(\ )$  - f.d.a. da distribuição normal padrão;

$\varphi(\ )$  - f.d.p. da distribuição normal padrão.

Resolvendo o sistema das **equações (5.14) e (5.15)**, obtêm-se:

$$\sigma_{ui}^N = \frac{\varphi\{\Phi^{-1}[F_{ui}(U_i^*)]\}}{f_{ui}(U_i^*)} \quad (5.18)$$

$$\mu_{ui}^N = U_i^* - \sigma_{ui}^N \Phi^{-1}[F_{ui}(U_i^*)] \quad (5.19)$$

Esta transformação pode ser diretamente empregada quando as distribuições de probabilidade das variáveis não forem correlacionadas. Para o caso de variáveis correlacionadas este procedimento pode ser utilizado desde que se calcule a correção equivalente entre as variáveis (Kiureghian e Liu, 1986).

Com as médias, desvios padrões e coeficientes de correlação normais equivalentes para todas as variáveis a transformação de variáveis é facilmente obtida pela **equação (5.13)**.

Um exemplo desta transformação de variáveis, que será utilizada no decorrer deste trabalho, é a transformação de uma distribuição log-normal para uma distribuição normal. Para isso tem-se que a média e o desvio padrão de  $\ln(U)$ , são, respectivamente,  $\lambda_u = E(\ln(U))$ ; e  $\xi_u = \sqrt{V(\ln(U))}$ .

Utilizando o método descrito acima pelas **equações (5.16) a (5.19)**, e partindo da **equação (4.14)**, que descreve a função densidade de probabilidade de uma distribuição lognormal, é possível estabelecer uma relação entre  $\lambda$  e  $\xi$  com a média e o desvio padrão da variável  $U^*$ , conforme abaixo:

$$\xi_u^2 = \ln \left( 1 + \left( \frac{\sigma_u}{\mu_u} \right)^2 \right) \quad (5.20)$$

$$\lambda_u = \ln(\mu_u) - \frac{1}{2} \xi_u^2 \quad (5.21)$$

Com isso é possível obter as normais equivalentes através de:

$$\mu_u^N = U^* \cdot (1 - \ln(U^*) + \lambda_u) \quad (5.22)$$

$$\rho_u^N = U^* \cdot \xi_u \quad (5.23)$$

## 5.2.2 Determinação do Ponto de Projeto

Um dos principais desafios do método FORM é o de encontrar o ponto de projeto  $V^*$  sobre a superfície de falha, mais próximo da origem. Isto pode ser formulado como um problema de otimização ou programação não-linear com uma descrição que pode ser expressa por:

$$\begin{aligned} \text{P1:} \quad & \text{minimize } |V| \\ & \text{sujeito a } g(V) = 0 \end{aligned} \quad (5.24)$$

Existem na literatura diversos métodos para resolver este problema de otimização. Os métodos mais eficientes são os métodos baseados nos gradientes da função de falha e entre os métodos com esta característica, o mais difundido em confiabilidade estrutural é o método HLRF (Hasofer e Lind (1974); Rackwitz e Fiesser(1978)). Este método pode ser resumido pela seguinte expressão:

$$V^{K+1} = \frac{1}{|\nabla g(V^K)|} \cdot [\nabla g(V^K) \cdot V^K - g(V^K)] \cdot \nabla g(V^K)^T \quad (5.25)$$

Onde :

$\nabla g(V^K)$  é o gradiente da função de falha no espaço reduzido no ponto  $V^K$ ;

$g(V^K)$  é o valor da função de falha no espaço reduzido no ponto  $V^K$ .

Como o método de otimização HLRF é um método iterativo, deve-se estabelecer um critério de convergência, que pode ser:

$$\frac{|V^{K+1}| - |V^K|}{|V^{K+1}|} \leq \text{TOL} \quad (5.26)$$

Onde TOL é a tolerância admitida.

Outro ponto importante quando se utiliza o algoritmo HLRF é observância das seguintes relações:

$$\begin{aligned} g(V) &= G(U) \\ \nabla g(V) &= (J^{-1})^T \cdot \nabla G(U) \end{aligned} \quad (5.27)$$

Onde  $\nabla G(U)$  é o gradiente da função de falha no espaço original avaliado no ponto U.

### 5.2.3 Medidas de Sensibilidade

Além da probabilidade de falha, através do método FORM podem-se obter algumas importantes medidas de sensibilidade do índice de confiabilidade em relação a variação dos parâmetros que definem a função de falha. As principais medidas são:

- Fator de importância;
- Fator de omissão;
- Fatores de sensibilidade paramétricos.

O fator de importância é o parâmetro que informa a importância relativa das variáveis aleatórias  $U_i$  na análise de confiabilidade considerada, o fator de importância pode ser expresso como:

$$I_i = \alpha_i^2 \quad (5.28)$$

Onde  $\alpha_i$  é o cosseno diretor correspondente a variável  $U_i$  do vetor normal a superfície de falha no ponto de projeto, no espaço reduzido conforme descrito pela **equação (5.10)**.

O fator de omissão para uma variável aleatória é definido como a relação inversa entre o índice de confiabilidade atual e o índice de confiabilidade quando a variável aleatória é substituída por um valor determinístico.

Os fatores de sensibilidade paramétricos fornecem a variação do índice de confiabilidade ou a variação da probabilidade de falha quando ocorrem mudanças nos parâmetros que definem as distribuições de probabilidade das variáveis aleatórias envolvidas no problema.

As medidas de sensibilidade apresentam grande importância, pois auxiliam o engenheiro a determinar quais as variáveis aleatórias que apresentam maior influência na obtenção do índice de confiabilidade. No presente trabalho utiliza-se o fator de importância como medida de sensibilidade.



## 5.2.4 Algoritmo de análise de confiabilidade pelo método FORM

Para efeito de exemplificação, admite-se um sistema hipotético do tipo  $R \times S$ , para o qual se deseja determinar a confiabilidade, cuja função de falha  $G(\mathbf{U}) = R - S$ , e para qual o algoritmo será aplicado. No caso de dutos com defeitos, a variável aleatória de resistência ( $R$ ) pode ser definida por um dos métodos semi-empíricos descritos no Capítulo 3, já a solicitação ( $S$ ) trata-se da pressão de operação do duto.

Abaixo se apresenta, passo a passo o fluxo de cálculo do algoritmo, que no presente trabalho foi desenvolvido em uma rotina computacional desenvolvida no software Matlab:

**a)** Conhecendo-se a função de falha  $G(\mathbf{U})$  do problema, primeiramente calcula-se de maneira literal o gradiente da função de falha, utilizando-se da ferramenta de cálculo simbólico do software Matlab;

**b)** Verificação das correlações entre as variáveis para a obtenção da matriz  $\Gamma$ . Para variáveis estatisticamente independentes esta matriz é a matriz identidade.

**c)** Assumir como ponto de projeto inicial as médias da variável  $\mathbf{U}$  no espaço original;

**d)** Obter as normais equivalentes das médias e desvios padrões no ponto de projeto, conforme descrito no item 5.2.1 e montar as matrizes  $\sigma$  e  $\mathbf{m}$  ;

**d)** Avaliação da função de falha no espaço original e reduzido, através das equações:

$$G(\mathbf{U}) = R - S \quad (5.29)$$

$$G(\mathbf{V}) = G(\mathbf{U})$$

**e)** Determinação das variáveis aleatórias no espaço reduzido utilizando a **equação (5.13)**

**f)** Obtenção da matriz Jacobiana pela **equação (5.15)**;

**g)** Substituição de valores no gradiente calculado no item **a)** para obtenção do gradiente da função no espaço original;

**h)** Cálculo do gradiente no espaço reduzido pela **equação (5.27)**;

**i)** Determinar o novo ponto de projeto no espaço reduzido, utilizando a **equação (5.25)** do algoritmo de otimização HLRF;

**j)** Determinar o novo ponto de projeto no espaço original  $\mathbf{U}^{K+1}$  pela expressão:

$$\mathbf{U}^{K+1} = \mathbf{U}^K + (\mathbf{J}^{-1})^T \cdot (\mathbf{V}^{K+1} - \mathbf{V}^K) \quad (5.30)$$

k) Como  $V^{K+1}$  é o novo ponto de projeto no espaço reduzido, verifica-se através da **equação (5.26)** se o critério de convergência é alcançado.

Caso o valor calculado pela **equação (5.26)** seja superior a TOL, determina-se que os valores de U são os do novo ponto de projeto no espaço original, ou seja,  $U=U^{K+1}$ , e retorna-se com este novo valor ao item c), e repete-se este processo até que o critério de convergência seja alcançado;

l) Determinar o índice de confiabilidade  $\beta$  dado por:

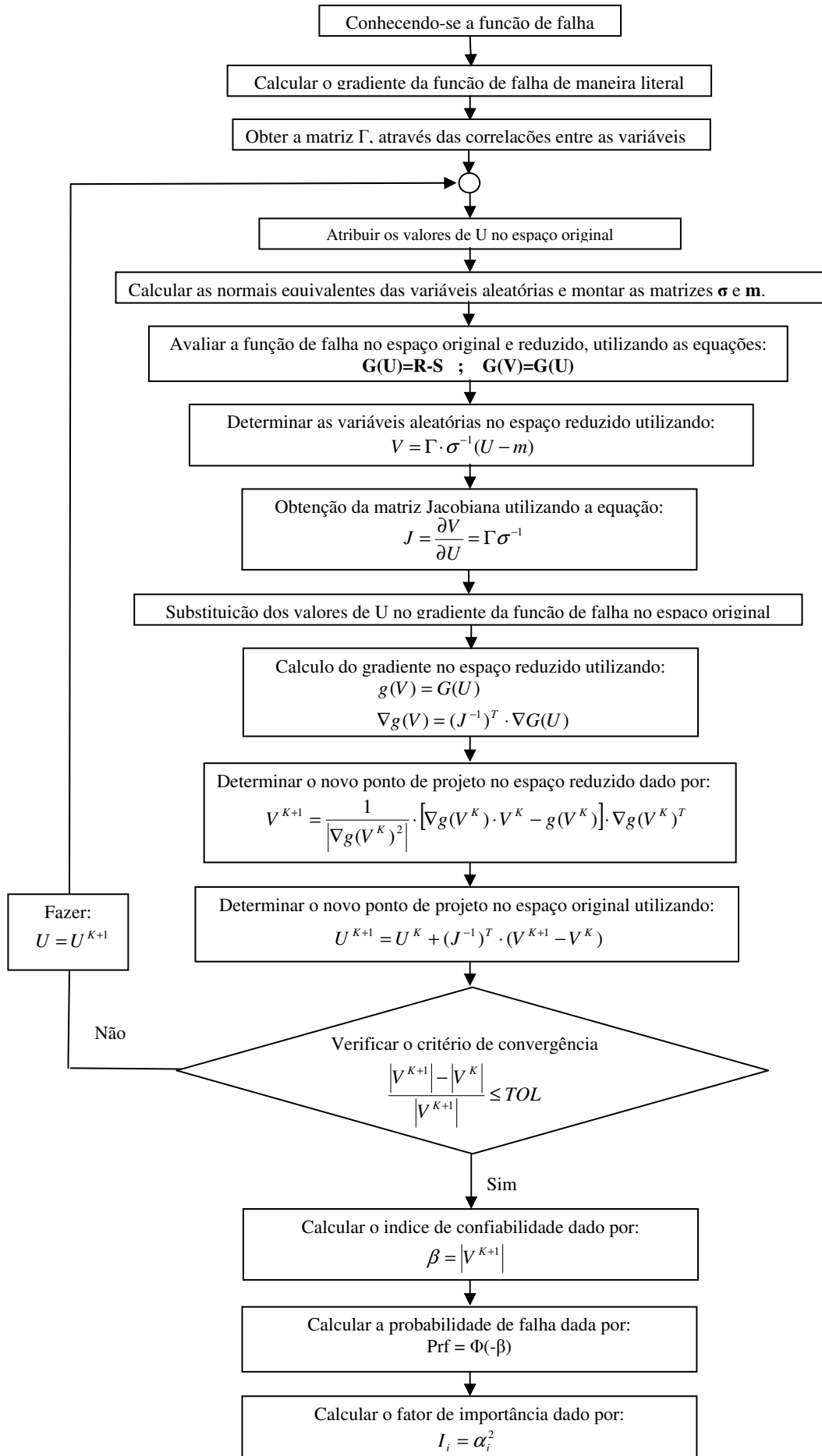
$$\beta = |V^{K+1}| \quad (5.31)$$

m) Após a obtenção da convergência, calcula-se a probabilidade de falha  $Pr_f$ , através da **equação (5.6)**;

n) Calcula-se o fator de importância através da **equação (5.28)**.

## 5.2.5 Fluxograma do algoritmo de análise de confiabilidade pelo método FORM

Na página seguinte encontra-se um fluxograma do algoritmo desenvolvido no presente trabalho e descrito anteriormente.



## 6 APLICAÇÕES DO ALGORITMO FORM

Neste capítulo, primeiramente é apresentado um estudo de caso existente na literatura e apresentado por Ahammed (1998), sobre a utilização do método FORM para o cálculo de confiabilidade estrutural em dutos com defeito de corrosão. Este exemplo é apresentado com o intuito de validar o algoritmo de cálculo apresentado na seção 5.3.3.

Após a validação algoritmo de cálculo através do exemplo apresentado, executa-se uma análise de confiabilidade comparativa entre os métodos semi-empíricos apresentados no capítulo 3. Logo em seguida executa-se a mesma análise nos espécimes apresentados por Choi (2003).

E, por último, com o intuito de reduzir a variabilidade entre resultados tanto de pressão de falha quanto de índice de confiabilidade entre os métodos semi-empíricos, realiza-se então uma análise com a adição de um fator de correção chamado de incerteza de modelagem.

### 6.1 Efeito da Corrosão no Duto ao Longo do Tempo

Segundo Ahammed (1998), se não forem tomadas medidas corretivas, é esperado que o defeito por corrosão cresça conforme o aumento do tempo de exposição. O crescimento do defeito por corrosão depende basicamente das características do material do duto, das propriedades do fluido transportado e pelo ambiente a sua volta. A taxa de corrosão é inicialmente alta e tende a diminuir gradualmente e em alguns casos estabilizar. Ahammed (1998) cita um estudo realizado por Southwell (1976), onde foram realizados diversos experimentos sobre corrosão em metais em ambiente atmosférico e em água do mar. Estes experimentos mostraram que após um período inicial onde a taxa de corrosão é relativamente alta, há uma tendência de a taxa de corrosão ter seu valor estabilizado. Este período inicial é de aproximadamente um ano de acordo com o resultado deste estudo. E segundo observações de Southwell (1976), uma aproximação linear para a taxa de crescimento do defeito de corrosão em seu estado estacionário é uma hipótese razoável.

Baseado nesta hipótese, a taxa crescimento do defeito de corrosão em seu estado estacionário, pode ser dada por:

$$\begin{aligned}
 R_d &= \frac{\Delta d}{\Delta T} \\
 R_a &= \frac{\Delta a}{\Delta T}
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

Onde  $R_d$  é a taxa de corrosão em seu estado estacionário na direção da profundidade do defeito ou taxa de corrosão radial, e  $R_a$  é a taxa de corrosão em seu estado estacionário na direção do comprimento do defeito, ou taxa de corrosão longitudinal, considerando-se ainda que  $\Delta d$  é a diferença entre duas medidas de profundidade do defeito,  $\Delta a$  é diferença entre duas medidas de comprimento do defeito e  $\Delta T$  é a diferença de tempo entre duas destas medidas.

Os valores de  $R_d$  e  $R_a$  são utilizados nas expressões abaixo para estimar a profundidade do defeito ( $d$ ) e o comprimento do defeito ( $a$ ) em qualquer tempo no futuro:

$$\begin{aligned}
 d &= d_0 + R_d \cdot (T - T_0) \\
 a &= a_0 + R_a \cdot (T - T_0)
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

Onde  $d_0$  e  $a_0$  são respectivamente os valores medidos de profundidade do defeito e comprimento do defeito no tempo  $T_0$ , sendo que  $T_0$  é o tempo da última inspeção do duto analisado.

## 6.2 Estudo de caso

Um exemplo de duto com defeito de corrosão é apresentado na literatura por Ahammed (1998) e reproduzido por Torres (2007). Para validação da metodologia apresentada no capítulo 5 referentes ao método analítico FORM, foi desenvolvido um programa em ambiente MatLab.

Ahammed (1998) apresenta um exemplo ilustrativo de uma tubulação típica com um defeito conhecido, com o intuito de demonstrar a metodologia apresentada no artigo. Este exemplo ilustrativo apresentado não possui nenhuma relação com um exemplo real e, portanto os valores e o tipo distribuição das variáveis aleatórias são baseados nas informações relevantes disponíveis. No entanto os valores escolhidos são considerados como sendo realísticos.

Neste exemplo a função de falha é dada por:

$$z = P_f - P_a \tag{6.3}$$

Onde  $P_a$  é a pressão aplicada pelo fluido no duto e  $P_f$  é a pressão de falha. Portanto, isso indica que se  $z$  assume valores positivos a tubulação está segura, porém se  $z$  assume valores negativos a tubulação está em um estado de falha.

Ahamed (1998) apresentou um critério de determinação da pressão de falha ( $P_f$ ) que se baseia na norma B31G modificada, conforme apresentado no item 3.3.3, só que foi adotado um valor unitário para o fator  $\alpha$ . Com isso e utilizando a aproximação linear para a taxa de corrosão conforme apresentado no item 6.1, a pressão de falha é dada por:

$$P_f = (\sigma_y + 68,95MPa) \frac{2t}{D} \left[ \frac{1 - \left( \frac{d_0 + R_d \cdot (T - T_0)}{t} \right)}{1 - \left( \frac{d_0 + R_d \cdot (T - T_0)}{t} \right) M^{-1}} \right] \quad (6.4)$$

Onde o fator de folias é dada por:

$$c) \quad \text{para } a_0 + R_a \cdot (T - T_0) \leq \sqrt{50Dt} \quad (\text{defeitos curtos})$$

$$M = \sqrt{1 + 0,6275 \frac{(a_0 + R_a \cdot (T - T_0))^2}{Dt} - 0,003375 \left( \frac{(a_0 + R_a \cdot (T - T_0))^2}{Dt} \right)^2} \quad (6.5)$$

$$d) \quad \text{para } a_0 + R_a \cdot (T - T_0) > \sqrt{50Dt} \quad (\text{defeitos longos})$$

$$M = 3,3 + 0,032 \frac{(a_0 + R_a \cdot (T - T_0))^2}{Dt} \quad (6.6)$$

Portanto a função de falha é dada por:

$$z = (\sigma_y + 68,95MPa) \frac{2t}{D} \left[ \frac{1 - \left( \frac{d_0 + R_d \cdot (T - T_0)}{t} \right)}{1 - \left( \frac{d_0 + R_d \cdot (T - T_0)}{t} \right) M^{-1}} \right] - P_a \quad (6.7)$$

Segundo dados apresentados por Ahmed (1998), a última inspeção do duto para observar a existência e obter dados dos defeitos foi realizada no tempo ( $T_0$ ) igual a 10 anos. Os parâmetros considerados como variáveis aleatórias foram diâmetro do duto ( $D$ ), espessura da parede ( $t$ ), comprimento inicial do defeito ( $a_0$ ), profundidade inicial do defeito ( $d_0$ ), taxa de corrosão radial ( $R_d$ ), taxa de corrosão longitudinal ( $R_a$ ), tensão de escoamento do material ( $\sigma_y$ ) e a pressão interna ( $P_a$ ), que são as variáveis da função de falha dada pela **equação (6.7)**. Na **Tabela 6.1** encontram-se os valores e o tipo de distribuição de cada variável. Todas as

variáveis apresentam distribuição do tipo normal, com exceção da tensão de escoamento do aço X52, onde uma distribuição log-normal foi encontrada como a melhor aproximação.

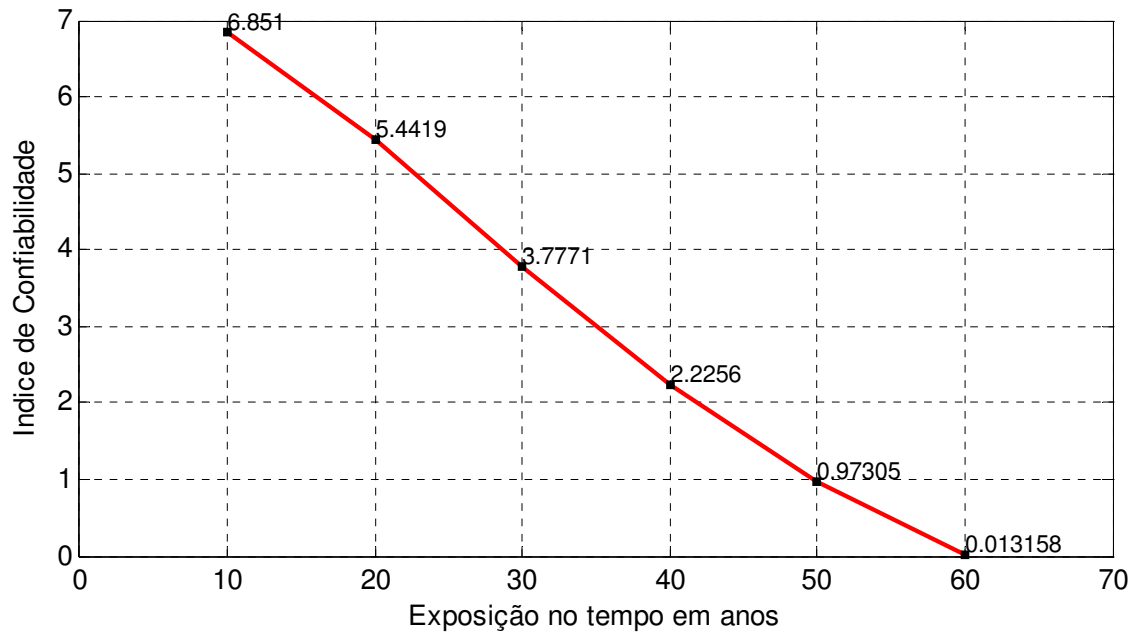
**Tabela 6.1** – Variáveis aleatórias e seus parâmetros usados no exemplo de duto com corrosão

Variável	Descrição	Função densidade de Probabilidade	Média	Coefficiente de Variação
$d_0$	Profundidade inicial do defeito	Normal	3 mm	0,1
D	Diâmetro do duto	Normal	600 mm	0,03
$a_0$	Comprimento inicial do defeito	Normal	200 mm	0,05
$P_a$	Pressão interna	Normal	5 MPa	0,1
$\sigma_y$	Tensão de escoamento do material do duto	Log-normal	423 MPa	0,067
t	Espessura de parede do duto	Normal	10 mm	0,05
$R_d$	Taxa de corrosão radial	Normal	0,10 mm/ano	0,2
$R_a$	Taxa de corrosão longitudinal	Normal	0,10 mm/ano	0,2

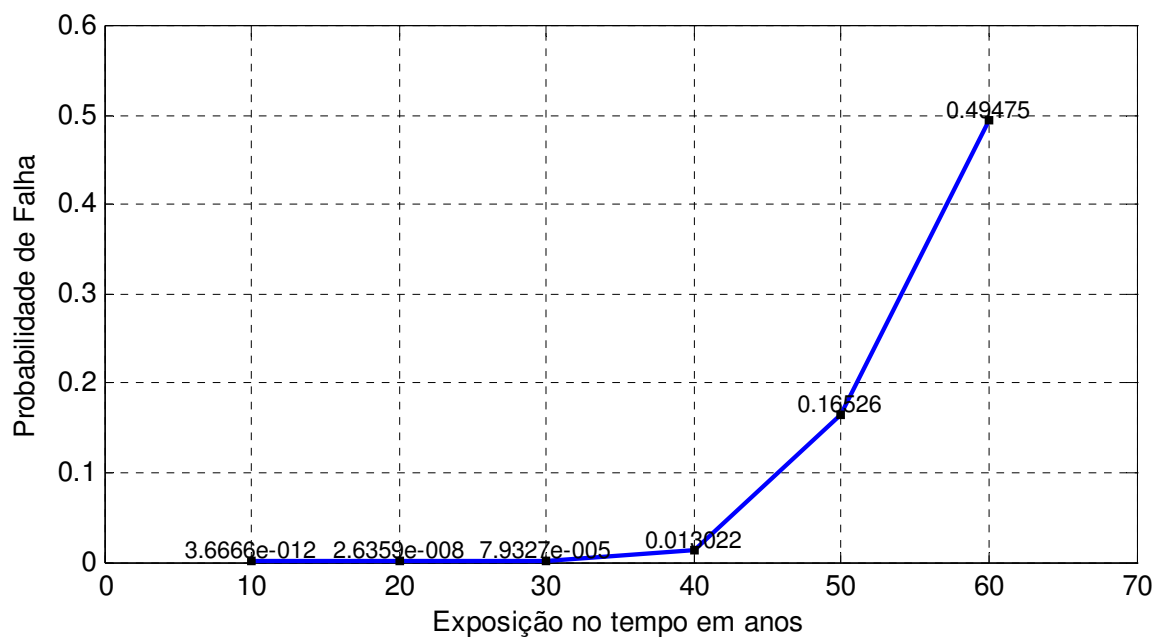
A análise de confiabilidade é efetuada para diversos valores de tempo de exposição(T), ou seja como a última inspeção foi realizada com 10 anos de exposição realiza-se a análise para este valor medido, e calcula-se a evolução do defeito para tempos de exposição futuros e executa-se a análise de confiabilidade. Os valores do índice de confiabilidade são apresentados na **Figura 6.1**, e os valores da probabilidade de falha são apresentados na **Figura 6.2**. Os resultados estão muito próximos dos resultados apresentados por Ahammed (1998), conforme pode ser verificado através da **Tabela 6.2** que reproduz os resultados apresentados no artigo de Ahammed (1998), juntamente com os dados do presente trabalho, indicando um bom desempenho da implementação do método FORM feita no presente trabalho.

Conforme os valores destacados na **Figura 6.1**, percebe-se que o índice de confiabilidade vai diminuindo com o passar do tempo, apresentando um comportamento de certa forma não-linear. Isso é esperado e pode ser explicado pelo fato que com o aumento do tempo de exposição a área do defeito aumenta, resultando em uma redução da capacidade do duto de resistir ao efeito da tensão devido ao carregamento aplicado e, conseqüentemente, causando um aumento da probabilidade de falha do duto. Com este gráfico é possível

determinar a vida remanescente de serviço do duto e planejar inspeções, reparo ou substituição do duto. Por exemplo, se o valor mínimo aceitável para o índice de confiabilidade for de 3, o que é um valor típico segundo Ahammed (1998), isso significa que a vida remanescente do duto é de 25 anos ( $T - T_0$ ). Portanto, após este período, o duto não está mais seguro para uso e é recomendado que seja reparado ou substituído.



**Figura 6.1** – Índice de confiabilidade *versus* período de exposição



**Figura 6.2** – Probabilidade de falha *versus* período de exposição



**Tabela 6.2** – Dados apresentados por Ahammed (1998) e no presente trabalho referentes ao índice de confiabilidade e probabilidade de falha.

Descrição	T=20 anos	T=30 anos	T=40 anos	T=50 anos
Índice de confiabilidade - Ahammed (1998)	5,442	3,777	2,226	0,973
Probabilidade de Falha - Ahammed (1998)	2,64E-08	7,95E-05	0,013	0,1653
Índice de confiabilidade - Presente Trabalho	5,4419	3,771	2,2256	0,97305
Probabilidade de Falha - Presente Trabalho	2,636E-08	7,933E-05	0,01322	0,16526

Uma segunda análise é efetuada através do cálculo de uma das medidas de sensibilidade apresentadas na seção 5.2.3, que é o fator de importância, dado pela **equação (5.26)**. A **Tabela 6.3** apresenta a contribuição de cada uma das variáveis aleatórias para o cálculo do índice de confiabilidade para diferentes tempos de exposição. Em uma análise comparativa entre os resultados do fator de importância do presente trabalho conforme a **Tabela 6.3** e os apresentados por Ahammed (1998) conforme a **Tabela 6.4**, podemos concluir que os resultados apresentados no presente trabalho são praticamente idênticos aos apresentados no artigo de Ahammed (1998).

Na **Tabela 6.5** é efetuada uma análise da diferença percentual, entre os valores do fator de importância do presente trabalho e os apresentados por Ahammed (1998). É possível destacar que apenas o fator de importância da variável aleatória  $d_0$  para o tempo de 20 anos apresenta uma diferença de 4,93%, nas outras variáveis esta diferença é menor que 0,2%. Deve ser tomada como observação que os dados apresentados na **Tabela 6.5** estão em número absoluto e para o cálculo de porcentagem foi utilizado um arredondamento para 2 casas decimais conforme os resultados apresentados por Ahammed (1998). Com isso pode-se concluir que o método apresentado no presente trabalho e o programa desenvolvido em ambiente Matlab estão de acordo com os resultados apresentados por Ahammed (1998), indicando um bom desempenho do algoritmo implementado.

**Tabela 6.3** – Cálculo do fator de importância de cada uma das variáveis dependente do tempo de exposição

Variável	Descrição	T=10 anos	T=20 anos	T=30 anos	T=40 anos	T=50 anos	T=60 anos
$d_0$	Profundidade inicial do defeito	12,5469	14,0735	13,2171	10,6816	8,1473	6,1817
D	Diâmetro do duto	2,4279	1,6017	0,8778	0,4887	0,3005	0,2028
$a_0$	Comprimento inicial do defeito	0,3276	0,3990	0,3695	0,2836	0,2062	0,1508
$P_a$	Pressão interna	20,5606	16,4506	11,2392	7,3981	5,0411	3,6047
$\sigma_y$	Tensão de escoamento do material do duto	11,1667	7,8739	4,6483	2,7348	1,7377	1,1935
t	Espessura de parede do duto	52,9703	53,3463	46,1503	35,6858	26,6296	19,9798
$R_d$	Taxa de corrosão radial	0,0000	6,2549	23,4971	42,7265	57,9363	68,6853
$R_a$	Taxa de corrosão longitudinal	0,0000	0,0002	0,0006	0,0010	0,0013	0,0015

**Tabela 6.4** – Dados apresentados por Ahammed (1998) referentes ao fator de importância para diferentes tempos de exposição. Fonte: Ahammed (1998)

Variável	Descrição	T=20 anos	T=30 anos	T=40 anos	T=50 anos
$d_0$	Profundidade inicial do defeito	14,80	13,23	10,69	8,15
D	Diâmetro do duto	1,60	0,88	0,49	0,30
$a_0$	Comprimento inicial do defeito	0,40	0,37	0,28	0,21
$P_a$	pressão do fluido	16,45	11,24	7,40	5,04
$\sigma_y$	tensão de escoamento do material	7,87	4,65	2,73	1,74
t	espessura de parede do duto	53,34	46,14	35,67	26,60
$R_d$	taxa de corrosão radial	6,26	23,51	42,75	57,96
$R_a$	taxa de corrosão longitudinal	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabela 6.5** – Diferença percentual em módulo entre os resultados apresentados por Ahammed (1998) e os resultados apresentados no presente trabalho.

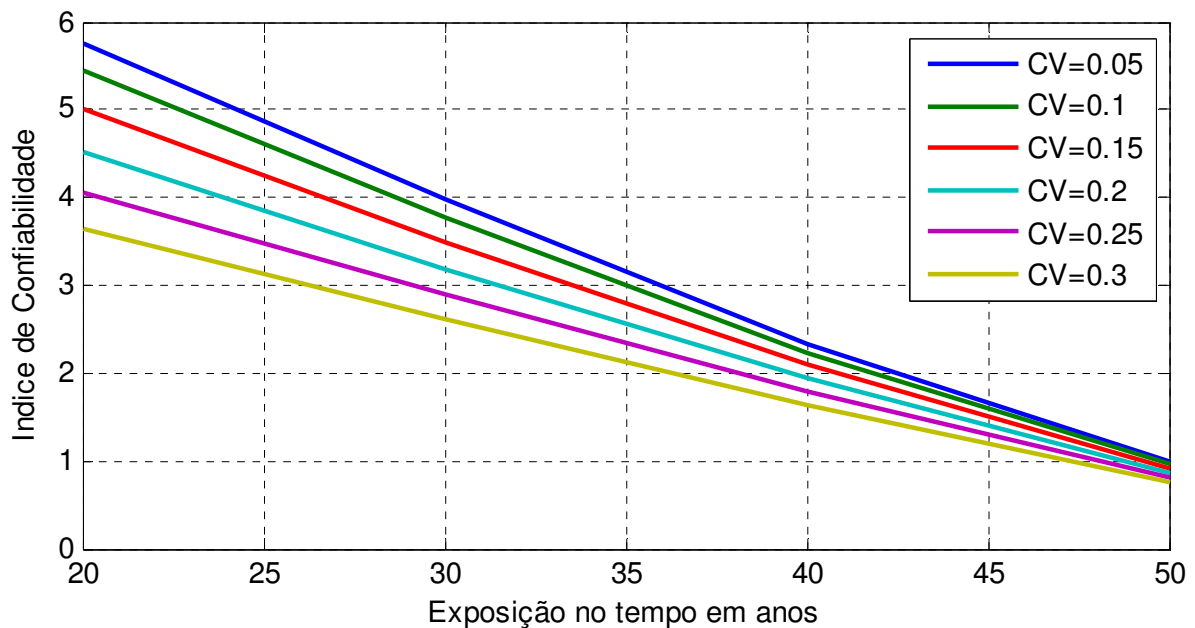
Variável	Descrição	T=20 anos	T=30 anos	T=40 anos	T=50 anos
d <sub>0</sub>	Profundidade inicial do defeito	4,93%	0,08%	0,09%	0,00%
D	Diâmetro do duto	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
a <sub>0</sub>	Comprimento inicial do defeito	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Pa	pressão do fluido	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
$\sigma_y$	tensão de escoamento do material	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
t	espessura de parede do duto	0,02%	0,02%	0,06%	0,11%
R <sub>d</sub>	taxa de corrosão radial	0,16%	0,04%	0,05%	0,03%
R <sub>a</sub>	taxa de corrosão longitudinal	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Pode ser visto na **Tabela 6.3** que a contribuição de algumas variáveis é baixa e continua baixa independente do tempo de exposição. Estas variáveis são por exemplo, diâmetro do duto (D), comprimento inicial do defeito (a<sub>0</sub>) e taxa de corrosão longitudinal (R<sub>a</sub>). Analisando esta baixa contribuição, pode-se dizer que não existirá uma diferença significativa do resultado final se estas variáveis forem tratadas como determinísticas ao invés de probabilísticas em uma análise de confiabilidade como esta. A contribuição de algumas variáveis tais como profundidade inicial do defeito (d<sub>0</sub>), pressão interna (Pa) e espessura da parede do duto (t), é alta no início e vai gradativamente diminuindo conforme o período de exposição aumenta, isso significa que a importância destas variáveis vai diminuindo com o passar do tempo. No entanto, a taxa de corrosão radial (R<sub>d</sub>) demonstra o oposto, ou seja, a sua contribuição é baixa no início e vai aumentando com o passar do tempo de exposição, o que a torna muito importante em dutos com grande tempo de exposição.

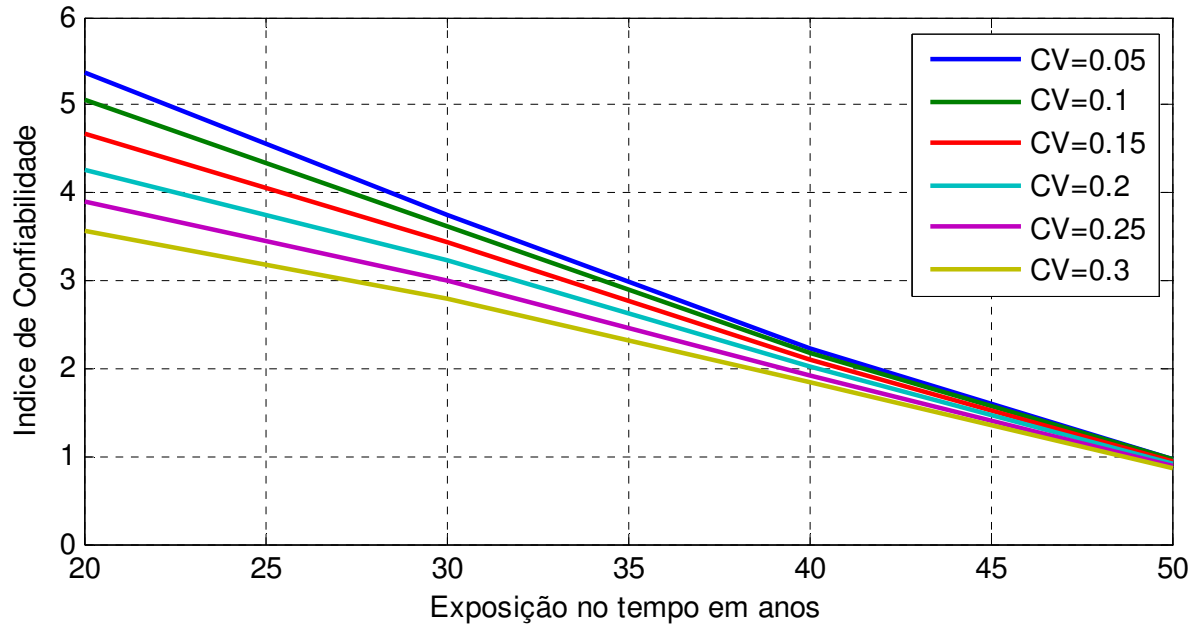
Um resultado esperado é que o índice de confiabilidade seja afetado pelo grau de incerteza da variável aleatória. Deve ser avaliado, então, que o valor do coeficiente de variação (CV), dado pela **equação (4.10)**, da variável aleatória é a medida do grau de incerteza. Contudo o comportamento e o impacto desta variação, não é assim óbvio. Portanto, é decidido demonstrar o efeito da variação do coeficiente de variação (CV) das variáveis

aleatórias no índice de confiabilidade. Para isso, o coeficiente de variação (CV) terá diferentes valores aplicados, ou seja, serão utilizados os dados apresentados na **Tabela 6.1**, e para uma das variáveis aleatórias serão aplicados valores de CV de 0,05 a 0,3, e é então analisado o valor do índice de confiabilidade para diferentes tempos de exposição. Este processo é repetido para todas as variáveis aleatórias e os resultados são apresentados nas **Figuras de 6.3 a 6.10**.

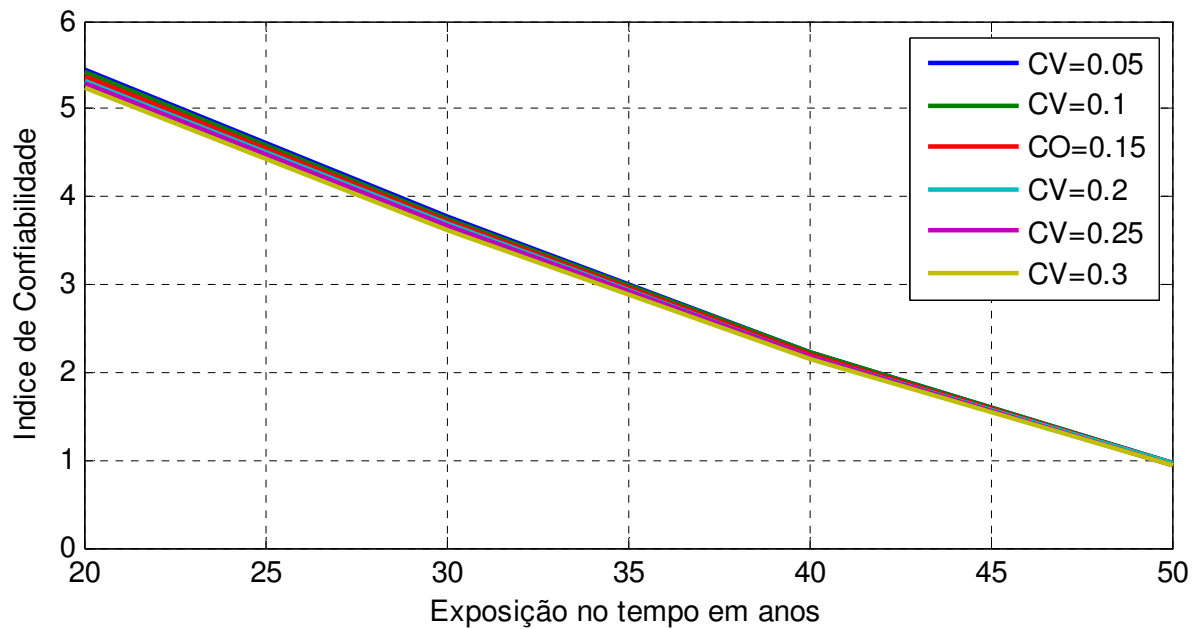
Note que conforme o valor do fator de importância da variável aleatória, com os resultados apresentados na **Tabela 6.3**, maior será o impacto da variação do CV no resultado do índice de confiabilidade. Isso é claramente percebido na **Figura 6.10** onde o fator de importância é próximo de zero e o valor do índice de confiabilidade não se altera independente do valor da CV. O inverso pode ser visto na **Figura 6.8**, que apresenta a variável aleatória  $P_a$ , que para fatores de importância altos existe um grande impacto da variação do CV no resultado do índice de confiabilidade.



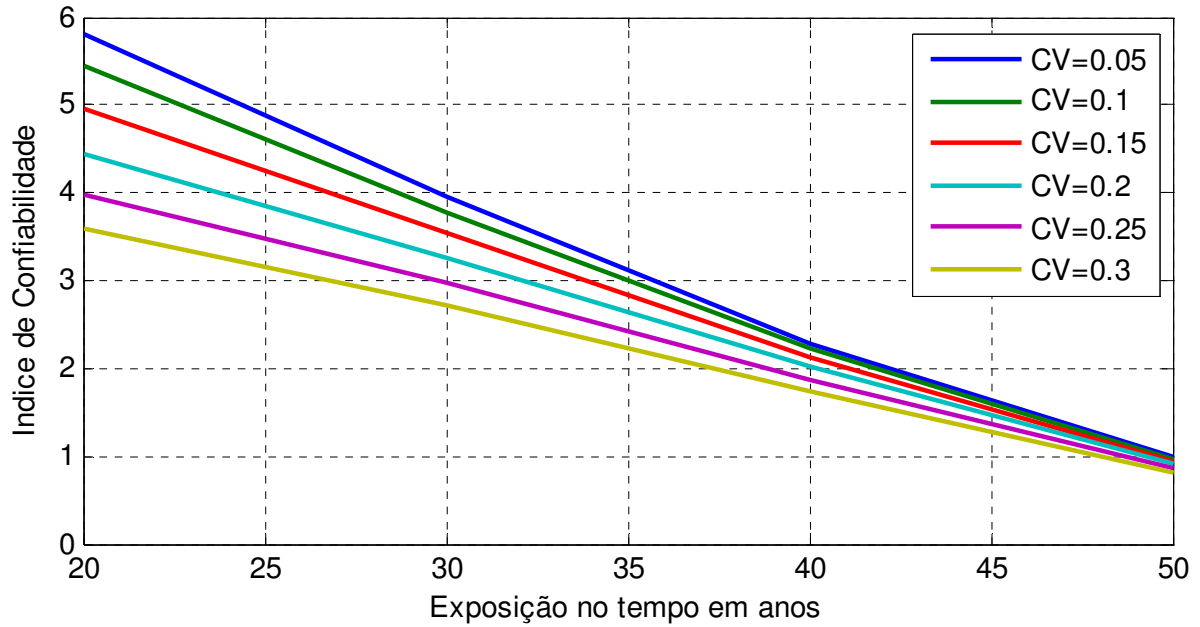
**Figura 6.3** – Índice de confiabilidade *versus* período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória profundidade inicial do defeito ( $d_0$ )



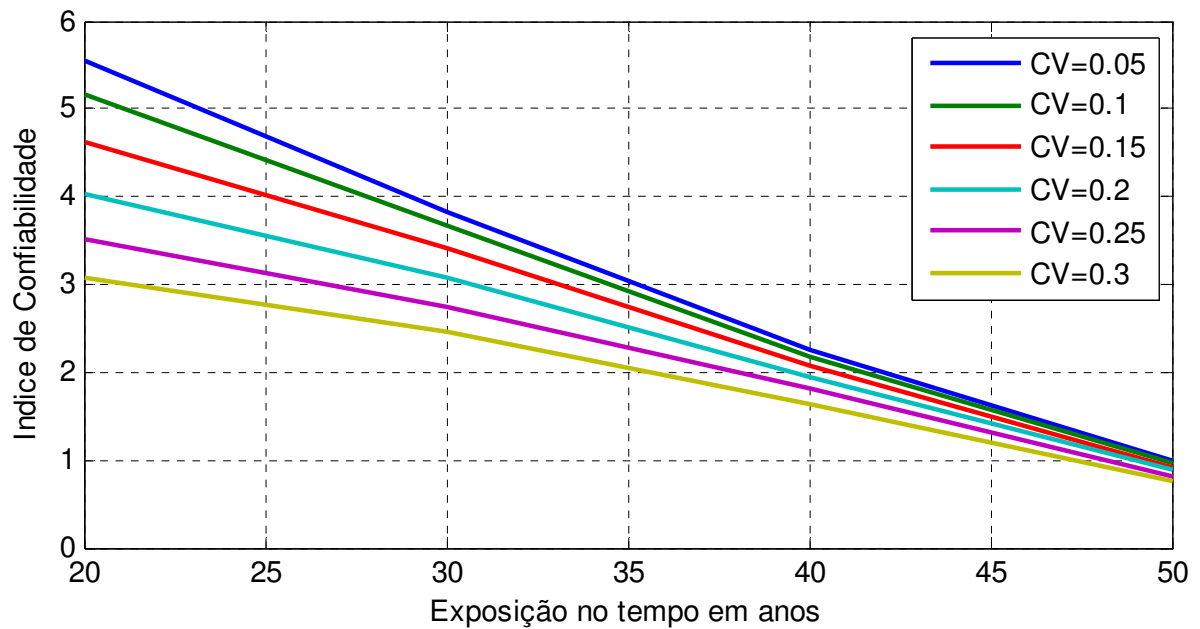
**Figura 6.4** – Índice de confiabilidade *versus* período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória diâmetro do duto (D)



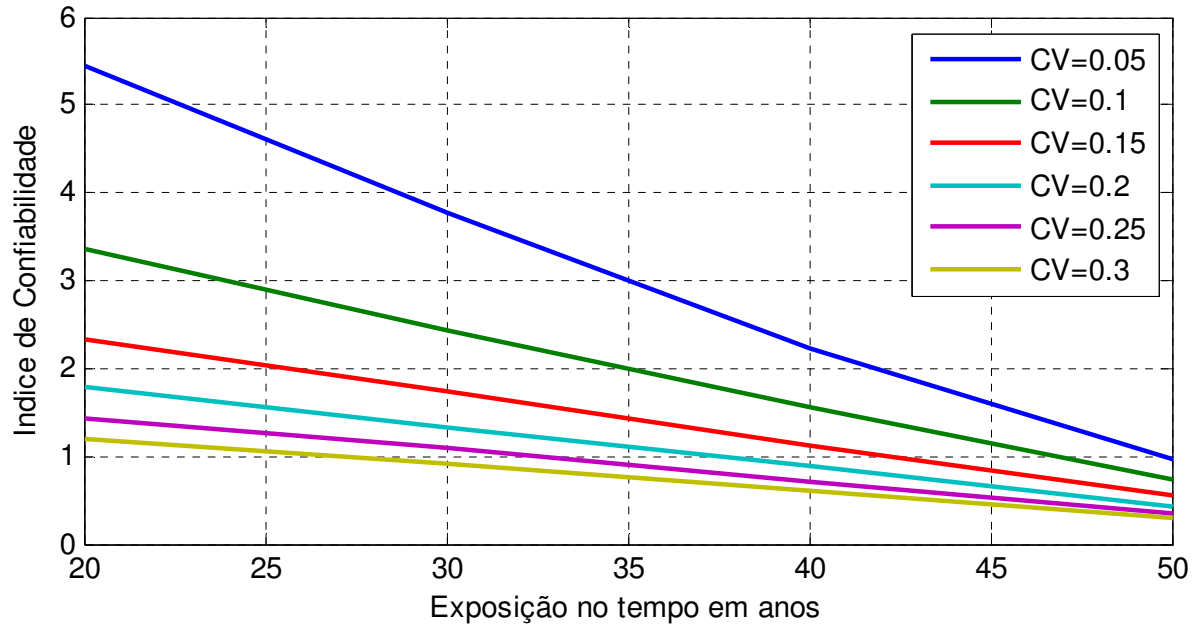
**Figura 6.5** – Índice de confiabilidade *versus* período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória comprimento inicial do defeito ( $a_0$ )



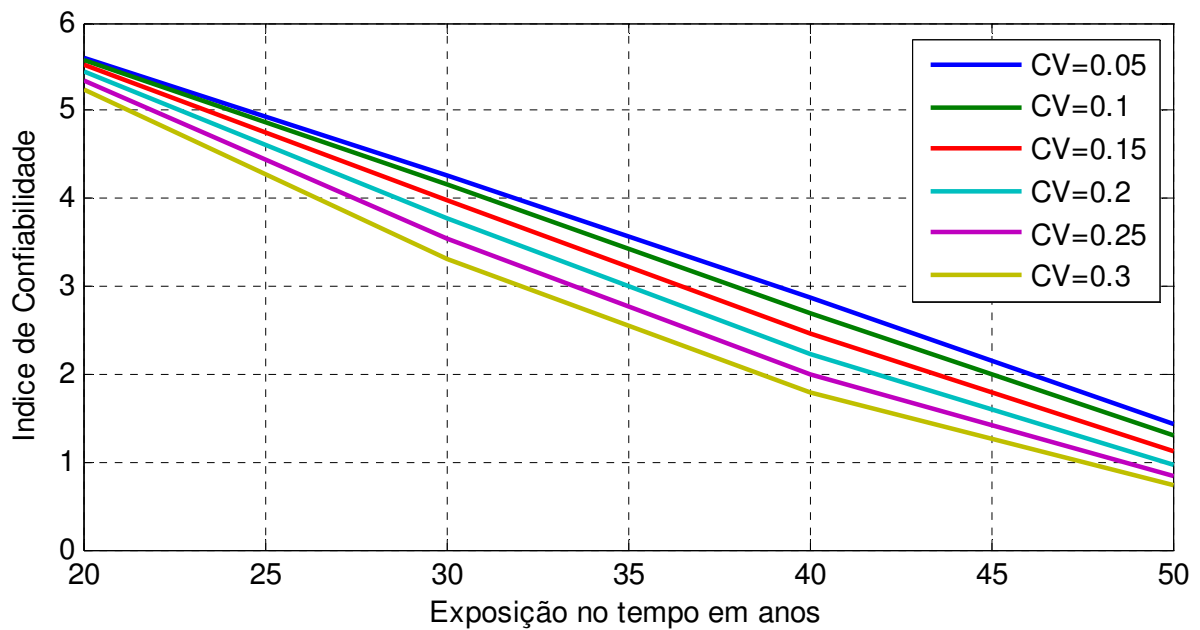
**Figura 6.6** – Índice de confiabilidade *versus* período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória pressão do fluido ( $P_a$ )



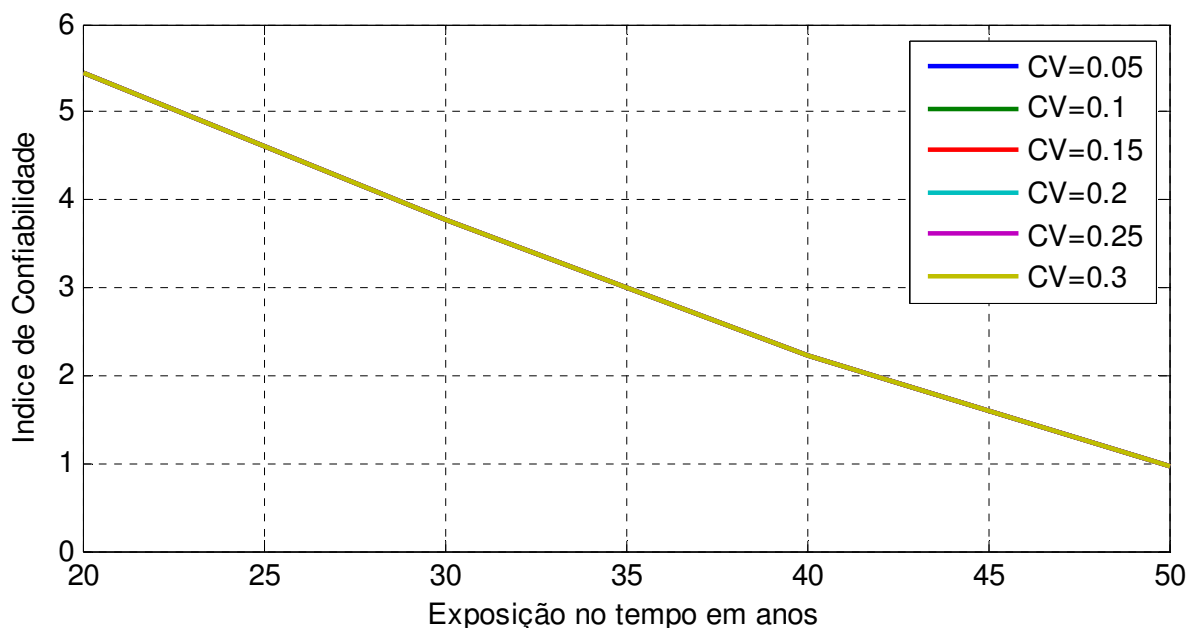
**Figura 6.7** – Índice de confiabilidade *versus* período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória tensão de escoamento do material do duto ( $\sigma_y$ )



**Figura 6.8** – Índice de confiabilidade *versus* período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória espessura da parede do duto ( $t$ )



**Figura 6.9** – Índice de confiabilidade *versus* período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória taxa de corrosão radial ( $R_d$ )



**Figura 6.10** – Índice de confiabilidade *versus* período de exposição para diferentes valores de coeficiente de variação (CV) da variável aleatória taxa de corrosão longitudinal ( $R_a$ )

### 6.3 Comparação entre os métodos semi-empíricos

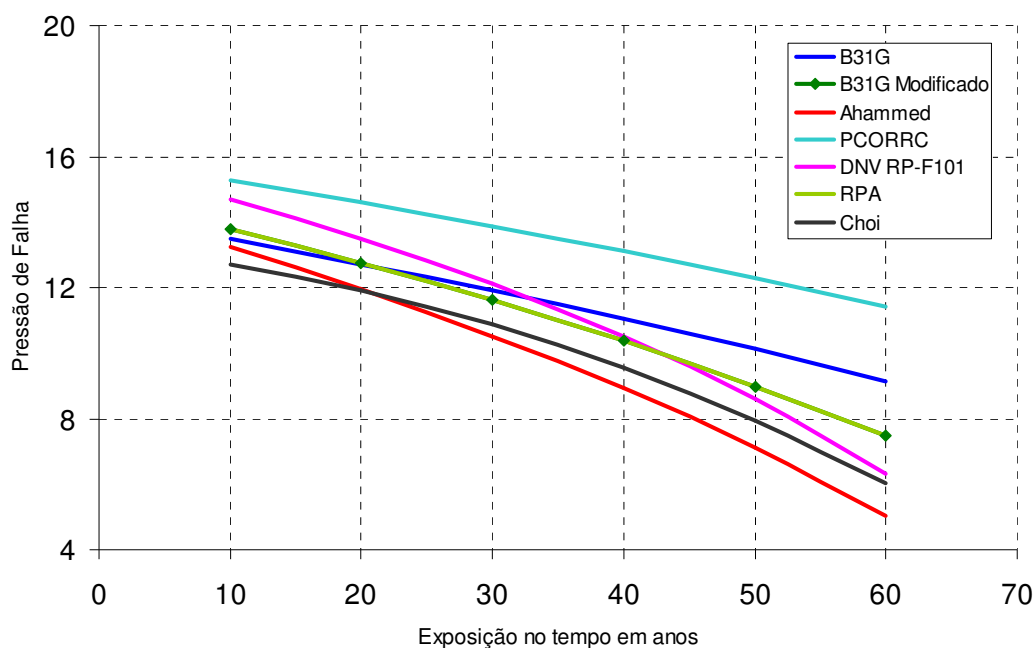
Nesta seção, será apresentada uma comparação entre os métodos semi-empíricos. Primeiramente utiliza-se a formulação apresentada na seção 3.2 para o cálculo da pressão de falha, e a variação desta pressão de falha com o aumento do tempo de exposição. Em seguida, utilizando o algoritmo apresentado na seção 5.3.3 efetua-se o cálculo do índice de confiabilidade e probabilidade de falha para cada um dos métodos semi-empíricos. É importante ressaltar que o aumento do defeito ao longo do tempo é dado por uma aproximação linear conforme apresentado na seção 6.1. Esta análise é realizada primeiramente utilizando os dados da **Tabela 6.1**, apresentados por Ahammed (1998), que representa um defeito curto. A única diferença é que em alguns métodos utiliza-se a tensão última do material, como é o caso do método DNV e o PCORRC. Portanto, é utilizado aqui a tensão última do material do duto ( $\sigma_u$ ) para o aço de classe X52 de 513 MPa. Em seguida, efetua-se a análise para defeitos chamados de transitórios, ou seja, defeitos que no início do tempo de exposição utilizam a formulação para defeitos curtos e que conforme a evolução no tempo de exposição o defeito passa a utilizar a formulação para defeitos longos. Logo em seguida será realizada uma análise para defeitos longos. Vale lembrar que a distinção entre defeito curto e longo depende de cada método semi-empírico, conforme apresentado na seção



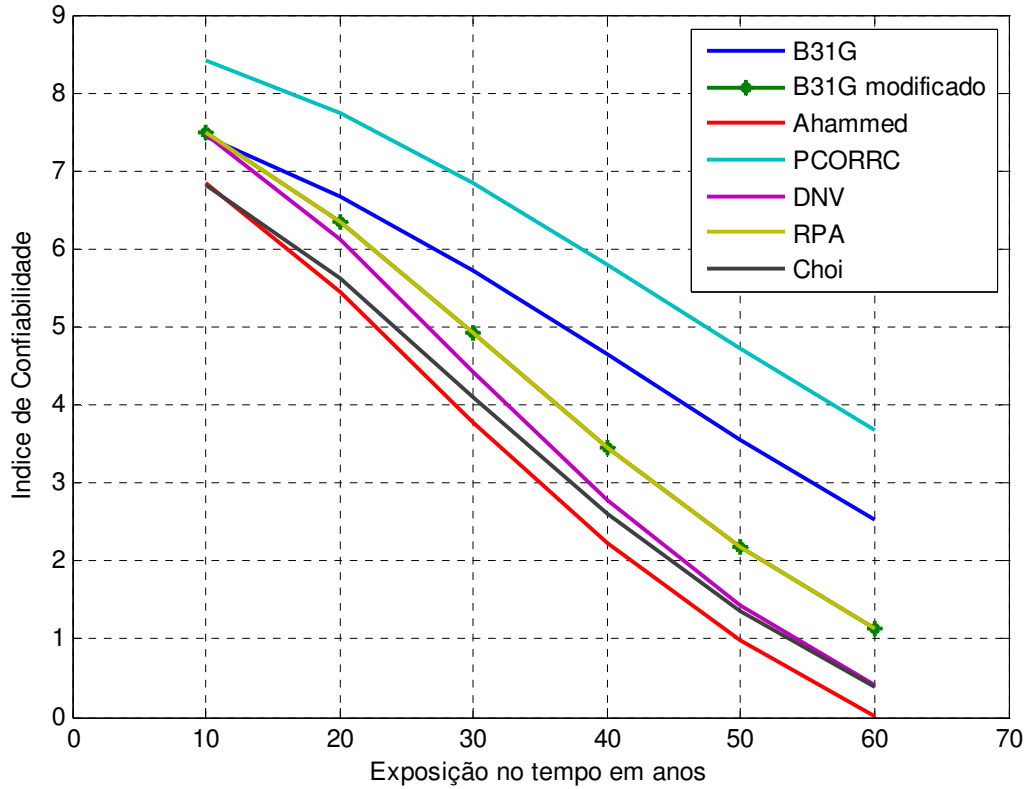
3.2 do presente trabalho. Em seguida é realizada a mesma análise para os espécimes apresentados por Choi (2003).

### 6.3.1 Defeitos Curtos

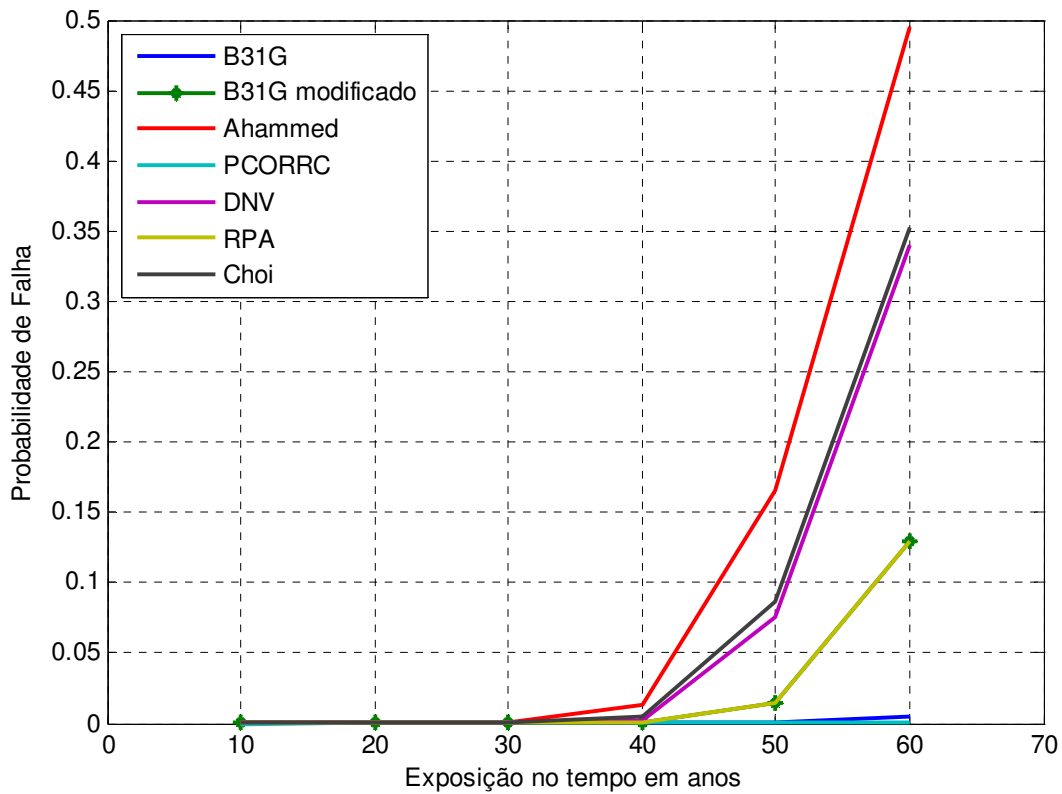
Para realizar a análise comparativa entre os métodos para defeitos curtos serão utilizados os dados da **Tabela 6.1**, porém utilizando aqui a tensão última do material do duto ( $\sigma_u$ ) para o aço de classe X52 de 513 MPa, com um coeficiente de variação igual ao da tensão de escoamento do material, com valor de 0,067. Foram obtidos os resultados conforme a **Figura 6.11** para pressão de falha, conforme a **Figura 6.12** para o índice de confiabilidade e conforme a **Figura 6.13** para a probabilidade de falha.



**Figura 6.11** – Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos



**Figura 6.12** – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos.

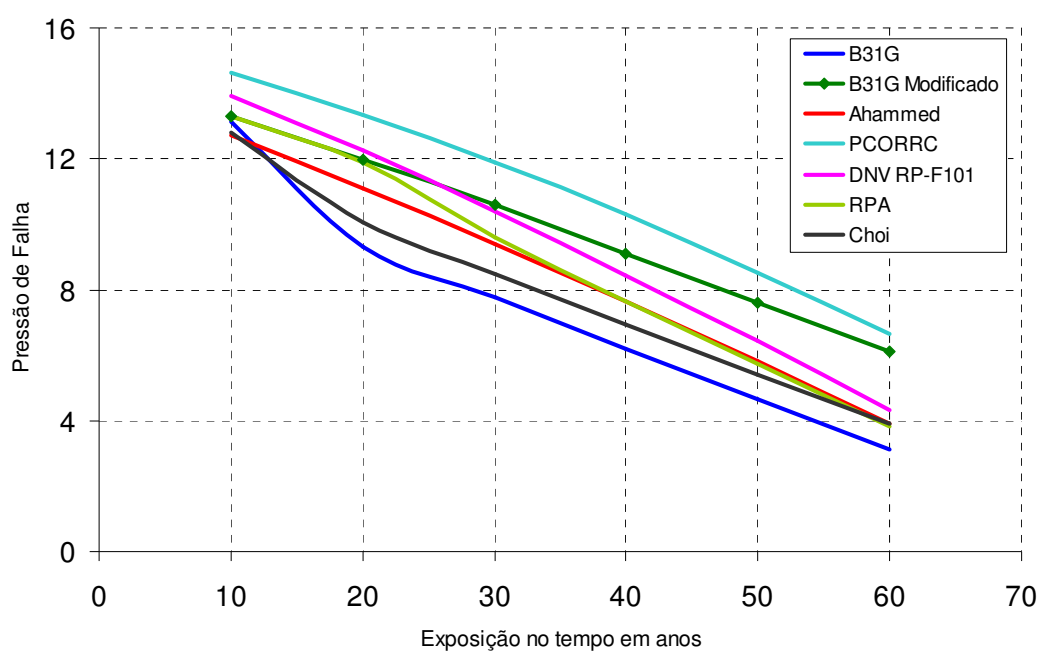


**Figura 6.13** – Probabilidade de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos.

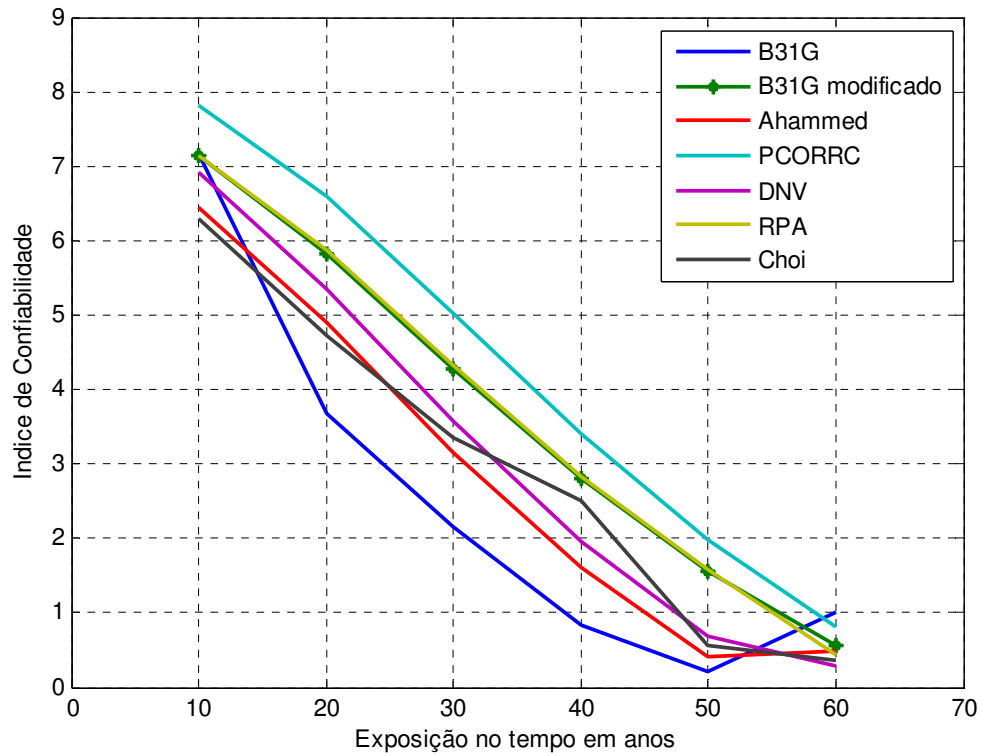
É possível verificar a variação da pressão de falha, do índice de confiabilidade e da probabilidade de falha entre os métodos semi-empíricos, para defeitos curtos. Analisando as **Figuras 6.11, 6.12 e 6.13** é possível observar a influência das incertezas na análise de confiabilidade, que possui maior impacto em alguns métodos como o DNV. Este método no tempo  $T_0$ , ou seja, 10 anos possui a segunda maior pressão de falha, porém o índice de confiabilidade é praticamente o mesmo que os métodos B31G, B31G modificado e RPA.

### 6.3.2 Defeitos Transitórios

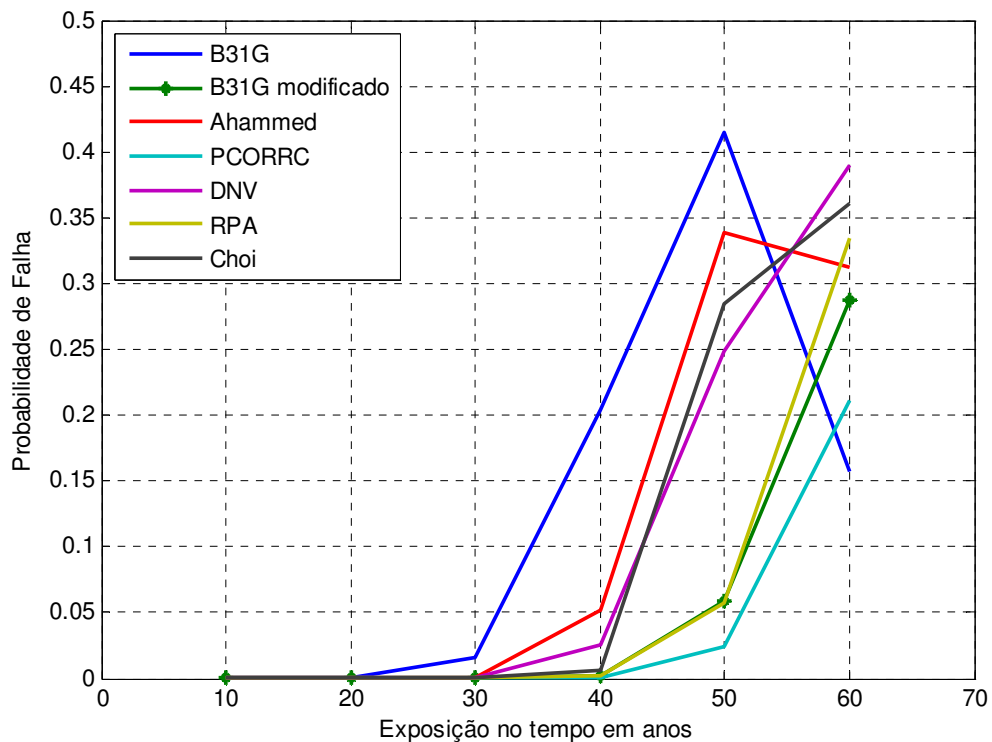
Para realizar a análise comparativa entre os métodos para defeitos transitórios, ou seja, nesta análise, as formulações que sofrem alterações entre defeitos curtos e longos, como B31G, B31G modificado, Ahammed, RPA e Choi, estarão passando por esta mudança de formulação conforme a evolução da corrosão. Para isso serão utilizados os mesmos dados de para defeitos curtos, porém o comprimento inicial do defeito ( $a_0$ ) é de 300 mm e a taxa de corrosão longitudinal ( $R_a$ ) é de 5 mm/ano. São obtidos os resultados conforme a **Figura 6.14** para pressão de falha, conforme a **Figura 6.15** para o índice de confiabilidade e conforme a **Figura 6.16** para a probabilidade de falha.



**Figura 6.14** – Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios.



**Figura 6.15** – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios.



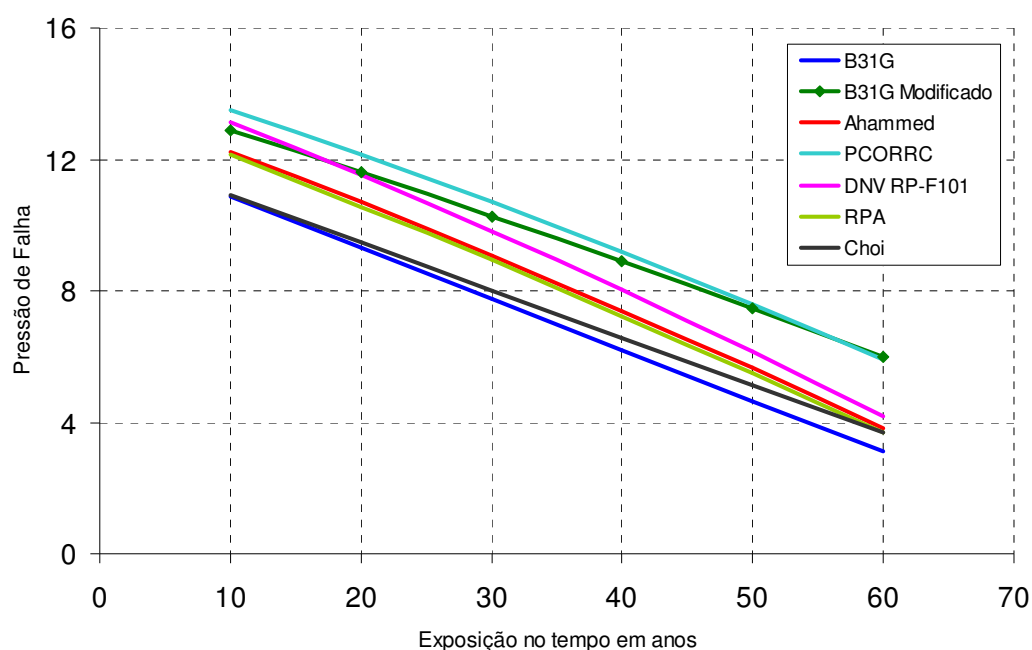
**Figura 6.16** – Probabilidade de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios.

Analisando comparativamente os gráficos com os resultados, é possível perceber que todos os métodos utilizam a formulação para defeitos curtos na primeira inspeção ( $T_0$ ), e conforme ocorre a evolução da corrosão a formulação se altera para a formulação de defeitos longos e isso ocorre em  $T$  igual a 20 anos para os métodos B31G, RPA e Choi. Para os métodos B31G modificado e Ahammed, a mudança de formulação se dá para  $T$  igual a 60 anos. Os demais métodos não consideram alteração de formulação conforme comprimento do defeito.

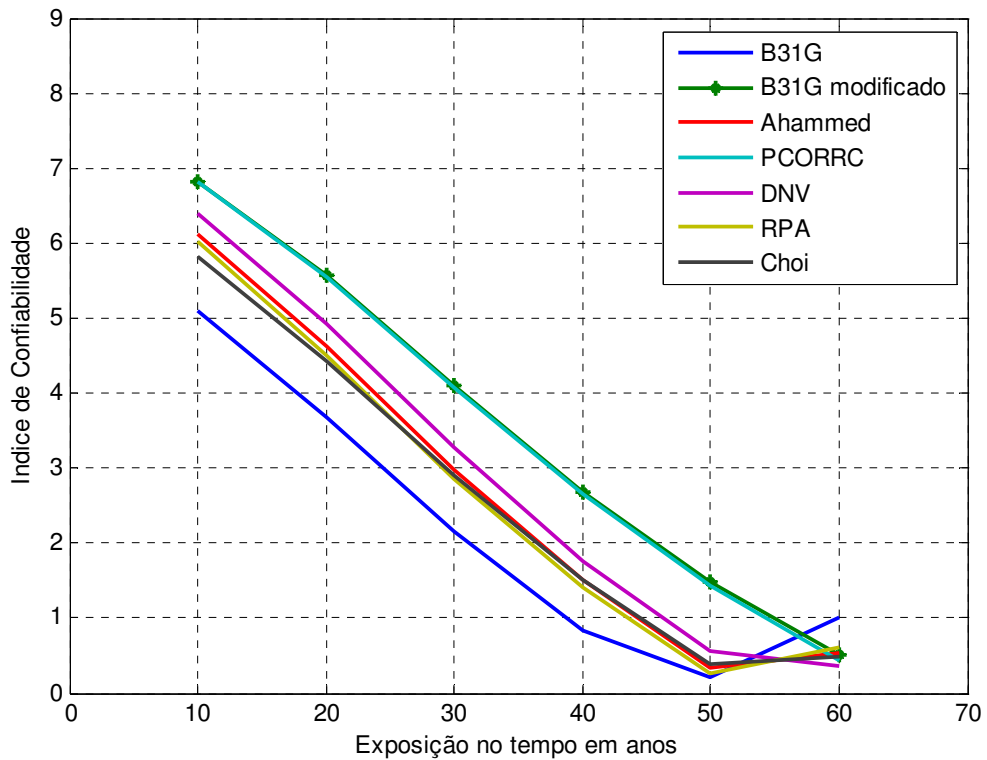
Esta alteração de formulação pode ser percebida nas **Figuras 6.14, 6.15 e 6.16**. É possível concluir que na análise de confiabilidade, como consideram-se as incertezas, a influência desta alteração é ainda maior do que na análise determinística de pressão de falha.

### 6.3.3 Defeitos Longos

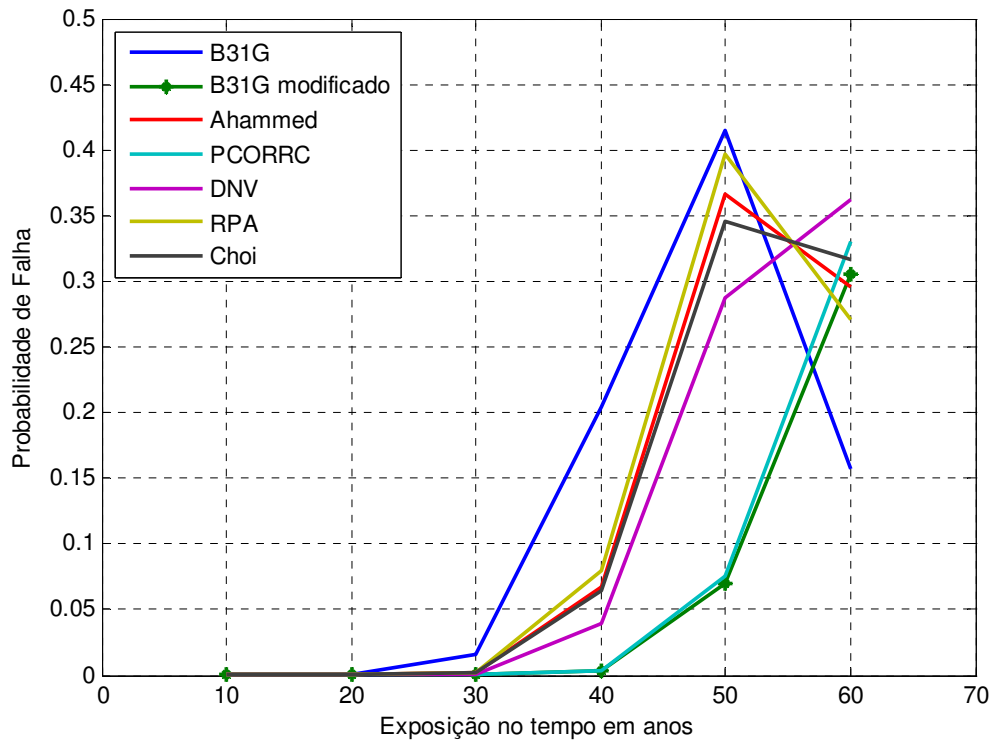
Para realizar a análise comparativa entre os métodos para defeitos longos serão utilizados os mesmos dados utilizados para defeitos curtos, porém o comprimento inicial do defeito ( $a_0$ ) é de 550 mm e a taxa de corrosão longitudinal ( $R_a$ ) é de 2 mm/ano. São determinados os resultados conforme a **Figura 6.17** para pressão de falha, conforme a **Figura 6.18** para o índice de confiabilidade e conforme a **Figura 6.19** para a probabilidade de falha.



**Figura 6.17** – Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos



**Figura 6.18** – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos.



**Figura 6.19** – Probabilidade de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos.

Pode-se verificar nas **Figuras 6.17, 6.18 e 6.19** que os defeitos longos produziram maior variação da pressão de falha e do Índice de confiabilidade entre os métodos semi-empíricos que para os defeitos curtos. O método B31G, por exemplo, não indicado para defeitos longos por ser muito conservador, foi o que apresentou a menor pressão de falha. Entretanto a taxa de variação deste método é comparável à do PCORRC ou do B31G modificado, que apresentam maior pressão de falha. O método DNV apresentou pressão de falha em valor intermediário aos dos métodos citados, mas a taxa de variação dessa pressão é maior.

Para a análise de defeitos transitórios e longos, alguns métodos apresentam um crescimento ou uma estabilização do índice de confiabilidade quando este assume valores menores do que a unidade. Isso se deve, pois a tendência da curva seria de assumir valores negativos, porém conceitualmente e matematicamente isso não é possível. Pois conceitualmente, o índice de confiabilidade é a distancia entre o ponto de projeto e a origem, que é dado matematicamente pela norma do ponto de projeto que é calculado através da **equação 5.5**. Isso explica a divergência que ocorre em alguns resultados, de toda forma isso não seria um problema para o uso do método, pois quando o índice de confiabilidade assume um valor inferior a três deve-se tomar uma ação corretiva sobre este duto com defeito.

### **6.3.4 Espécimes de Choi (2003)**

Nesta seção será realizada uma análise determinística e de confiabilidade, comparativa entre os métodos semi-empíricos para os sete espécimes ensaiados por Choi (2003), conforme descrito na seção 3.3.1 do presente trabalho. Portanto serão utilizados os dados geométricos apresentados por Choi (2003) e serão definidos a pressão de operação do duto, a taxa de corrosão radial, a taxa de corrosão longitudinal, tensão de escoamento do material X65 e tensão de ruptura do material X65.

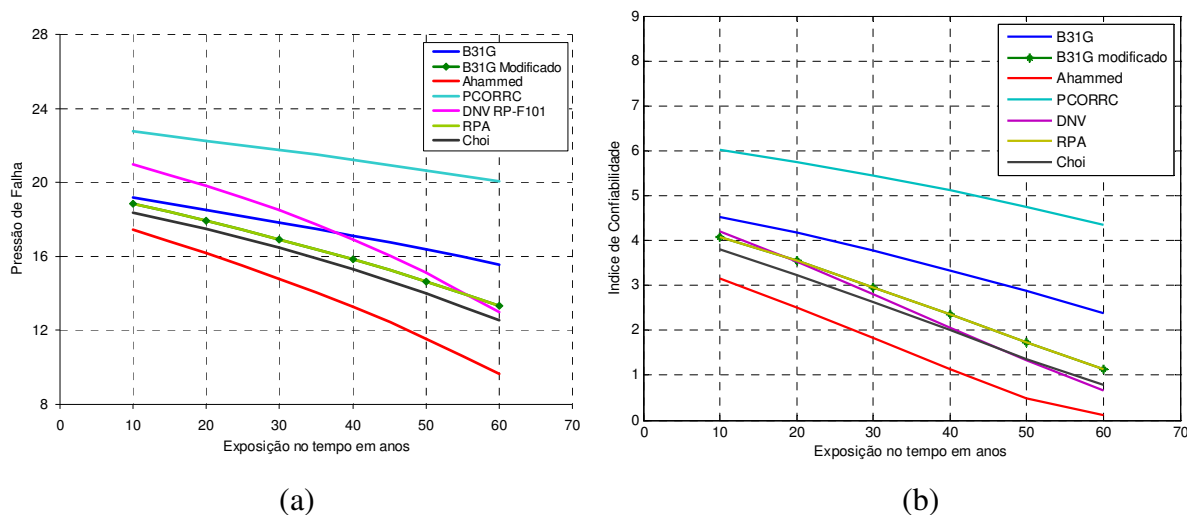
Os dados utilizados para esta análise estão descritos na **Tabela 6.6**, lembrando que Choi (2003) desenvolve o estudo para o aço X65 e os valores de tensão de escoamento e ruptura são definidos com base na **Tabela 2.1**. Os coeficientes de variação utilizados para cada uma das variáveis são os mesmos utilizados para a análise de defeitos curtos.

**Tabela 6.6** – Características dos espécimes descritos por Choi (2003).

Espécime	Dados apresentados por Choi (2003)					Dados definidos no presente trabalho				
	d0 (mm)	D (mm)	a0 (mm)	t (mm)	c (mm)	Pa (Mpa)	Rd (mm/ano)	Ra (mm/ano)	$\sigma_y$ (Mpa)	$\sigma_u$ (Mpa)
DA	4,4	762	200	17,5	50	10	0,1	0,1	467	573
DB	8,8	762	200	17,5	50	10	0,1	0,1	467	573
DC	13,1	762	200	17,5	50	5	0,1	0,1	467	573
LA	8,8	762	100	17,5	50	10	0,1	0,1	467	573
LC	8,8	762	300	17,5	50	10	0,1	0,1	467	573
CB	8,8	762	200	17,5	100	10	0,1	0,1	467	573
CC	8,8	762	200	17,5	200	10	0,1	0,1	467	573

É importante ressaltar que os métodos semi-empíricos utilizados para esta análise não levam em consideração a largura do defeito (c), com isso os espécimes DB, CB e CC que variam apenas a largura do defeito, fornecem resultados iguais e serão tratados em uma mesma análise no item 6.3.4.1. Outro ponto importante é que todos os espécimes ensaiados experimentalmente por Choi (2003) são considerados defeitos curtos por todos os métodos.

### 6.3.4.1 Espécimes DB / CB / CC



**Figura 6.20** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos



### 6.3.4.2 Espécime DA

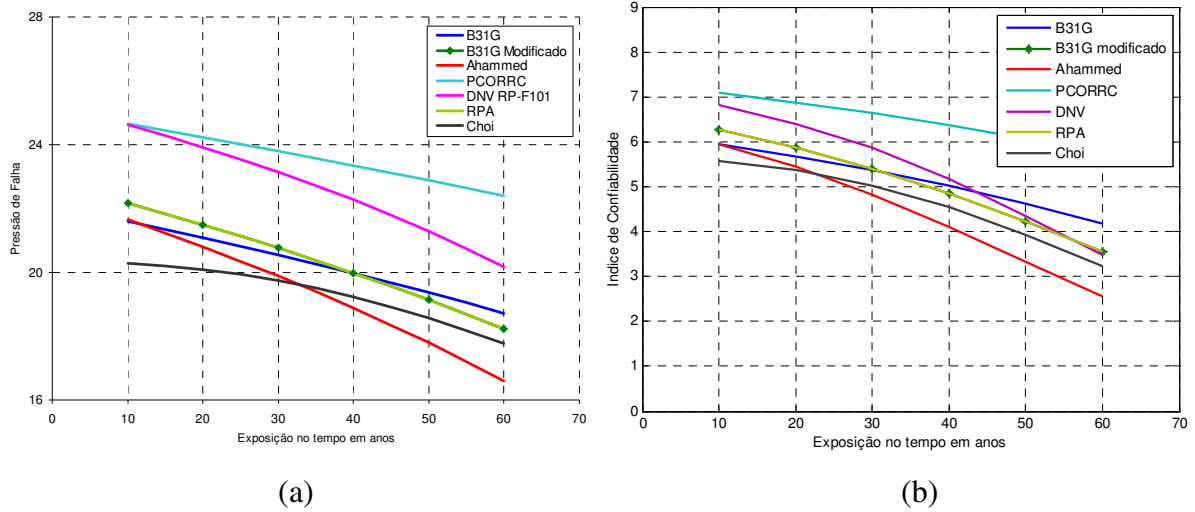


Figura 6.21 – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.3.4.3 Espécime DC

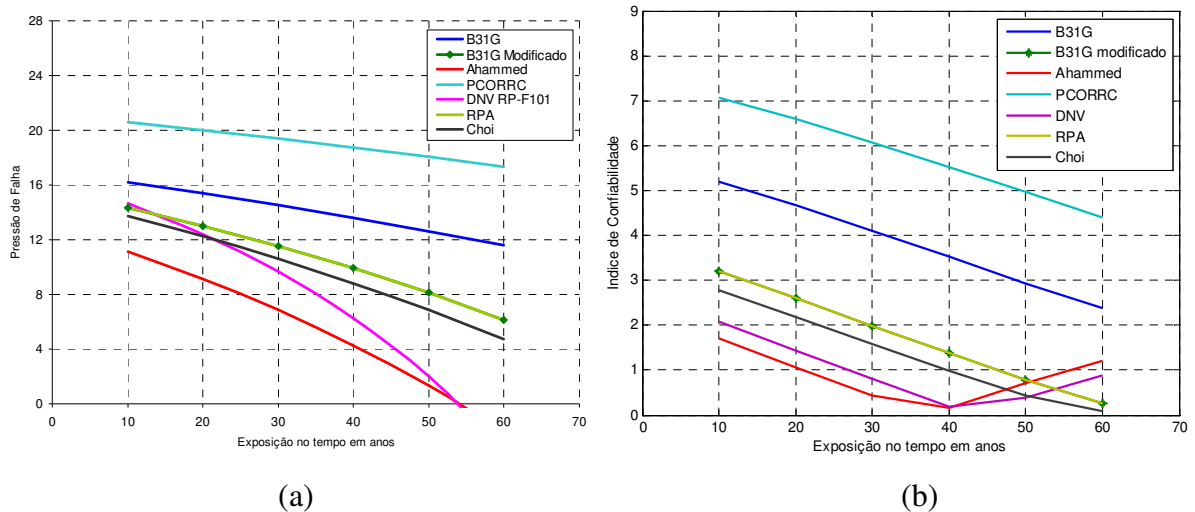
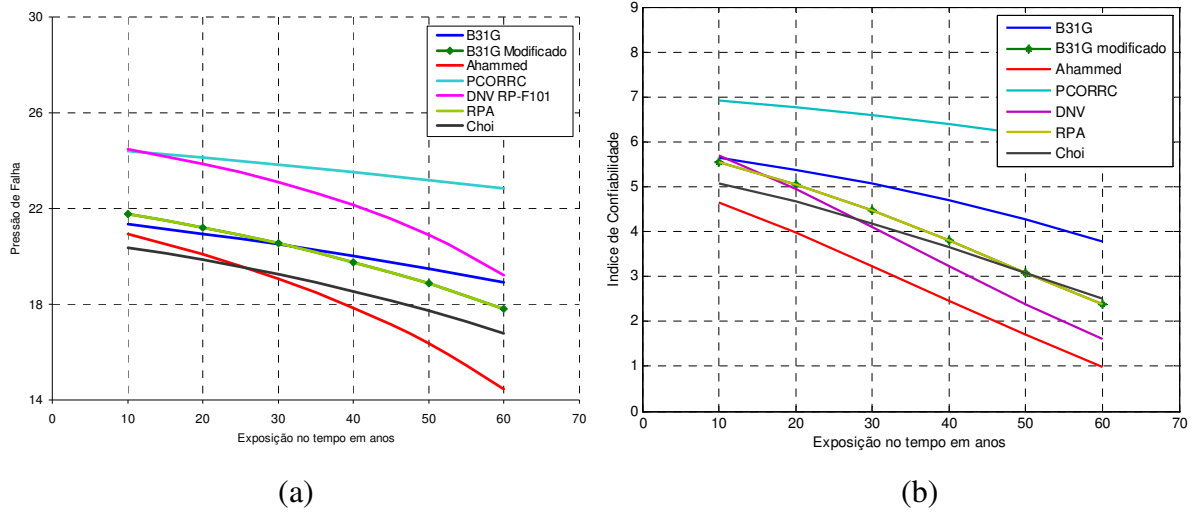


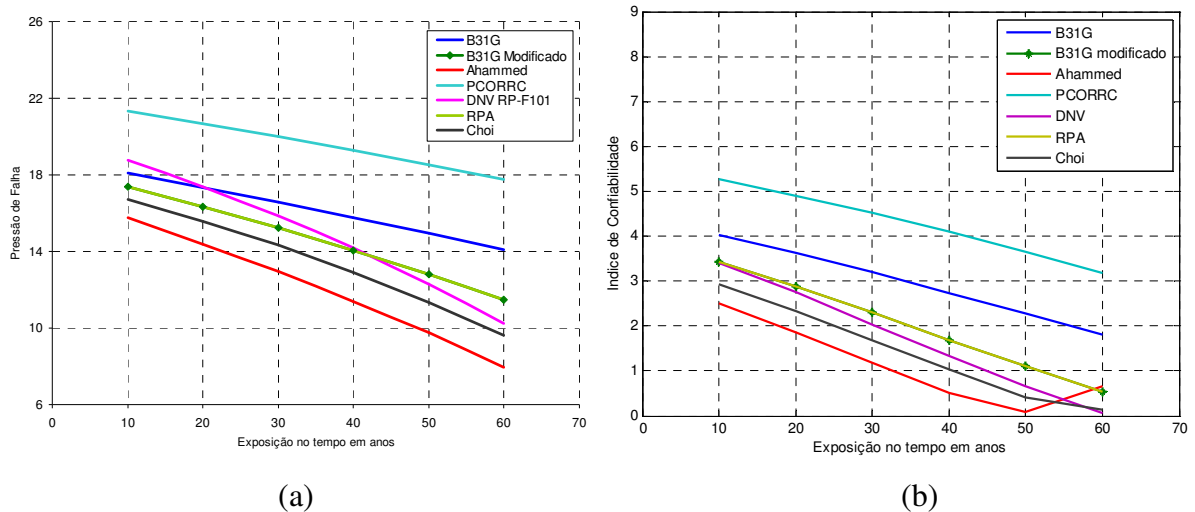
Figura 6.22 – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.3.4.4 Espécime LA



**Figura 6.23** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.3.4.5 Espécime LC



**Figura 6.24** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

## 6.4 Incerteza de Modelagem

Conforme pode ser analisado nos resultados apresentados na seção 6.3, existe uma grande variabilidade nos resultados de pressão de falha e índice de confiabilidade entre os métodos semi-empíricos. Porém não é possível determinar de maneira direta qual o resultado representa a realidade.

Isso foi a motivação para o desenvolvimento de trabalhos como o de Choi (2003) e o de Guimarães (2005), que apresentam como alternativa para se definir valores mais próximos da pressão de falha real através do desenvolvimento de uma nova formulação para o cálculo de pressão de falha. Esta nova formulação foi desenvolvida com base em análises experimentais e numéricas utilizando o método dos elementos finitos. Isso não será realizado no presente trabalho pois seria repetir algo já utilizado. De toda forma vale lembrar que um dos métodos semi-empíricos utilizados na comparação é a formulação apresentada por Choi (2003), conforme descrito na seção 3.4 do presente trabalho.

A alternativa utilizada no presente trabalho, para diminuir a variabilidade dos resultados obtidos é adicionar uma incerteza de modelagem na **equação (6.3)**, obtendo então a **equação (6.8)** a seguir apresentada. Esta incerteza de modelagem tem o intuito de multiplicar a pressão de falha fazendo com que os resultados obtidos pelos métodos estejam mais próximos da pressão de falha real. Para determinar esta incerteza de modelagem serão utilizados dados experimentais determinados por Choi (2003) e resultados de modelos de elementos finitos apresentados por Valentini (2006), que serão definidos como  $P_{real}$ , para calcular um fator IM, determinado pela **equação (6.9)**.

$$z = (IM \cdot P_f) - P_a \quad (6.8)$$

onde:

$$IM = \frac{P_{real}}{P_f} \quad (6.9)$$

Como a incerteza de modelagem varia para cada um dos testes analisados, serão utilizadas três abordagens para verificar qual o melhor resultado e as razões para isso. A primeira abordagem é utilizando um valor constante de IM para cada um dos métodos. Este fator é determinado a partir dos dados experimentais de Choi (2003) e a análise será descrita no item 6.4.1. Em seguida com o intuito de melhorar a precisão do fator de incerteza ainda utilizando os dados experimentais de Choi (2003), será efetuada uma aproximação por uma

equação de regressão, baseado nos valores de profundidade do defeito e comprimento do defeito, cuja análise está descrita no item 6.4.2. Como os ensaios apresentados por Choi (2003) somente utilizam defeitos curtos, será efetuada uma terceira abordagem utilizando os dados apresentados por Valentini (2006) para defeitos curtos e longos e efetuando uma aproximação do fator de incerteza, utilizando uma equação de regressão, tal como está descrito no item 6.4.3.

Estes valores do fator de incerteza serão então aplicados nos modelos descritos no item 6.3, para defeitos curtos, longos, transitórios e para as sete amostras apresentadas por Choi (2003) utilizando os mesmos valores de médias e coeficiente de variação, descritos na **Tabela 6.1** com as modificações descritas nos itens 6.3.1, 6.3.2 e 6.3.3 e na **Tabela 6.6**. E em seguida será calculado a pressão de falha e o índice de confiabilidade para cada um dos casos.

### 6.4.1 Incerteza de modelagem constante baseada em Choi (2003)

Nesta seção serão utilizados os resultados apresentados por Choi (2003) na **Tabela 3.1**, e serão calculados os valores de pressão de falha para cada um dos métodos conforme descrito na **Tabela 6.7** e utilizando a **equação (6.9)** determina-se o valor de IM para todos os sete casos apresentados. Em seguida para evitar que o fator de incerteza forneça valores que estejam contra a segurança portanto utiliza-se o menor valor de IM calculado para ser utilizado no cálculo da **equação (6.8)**.

**Tabela 6.7** – Dados de pressão de falha utilizados para o cálculo da incerteza de modelagem.

Espécime	Pressão de Ruptura Experimental Choi (2003) (MPa)	Método B31G (MPa)	B31G Modificado (MPa)	Ahammed (MPa)	Método RPA (MPa)	DNV RP-F101 (MPa)	Método PCORRC (MPa)	Choi (MPa)
DA	24,11	21,60	22,16	21,65	22,16	24,62	24,65	20,30
DB	21,76	19,17	18,87	17,43	18,87	20,99	22,75	18,35
DC	17,15	16,21	14,37	11,12	14,37	14,69	20,59	13,74
LA	24,3	21,34	21,78	20,92	21,78	24,48	24,39	20,38
LC	19,8	18,08	17,39	15,75	17,39	18,76	21,34	16,72
CB	23,42	19,17	18,87	17,43	18,87	20,99	22,75	18,35
CC	22,64	19,17	18,87	17,43	18,87	20,99	22,75	18,35

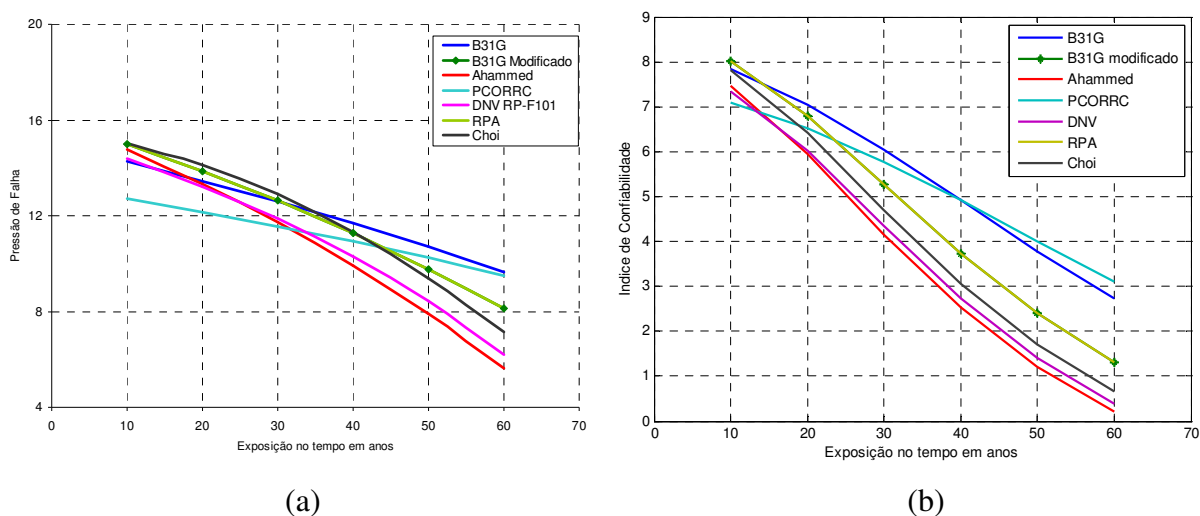
Com isso obtém-se que a incerteza de modelagem para cada um dos métodos é determinado na **Tabela 6.8**.

**Tabela 6.8** – Incerteza de modelagem para cada um dos métodos

	Método B31G	B31G Modificado	Ahammed	Método RPA	DNV RP-F101	Método PCORRC	Choi
Incerteza de Modelagem	1,058	1,088	1,114	1,088	0,979	0,833	1,184

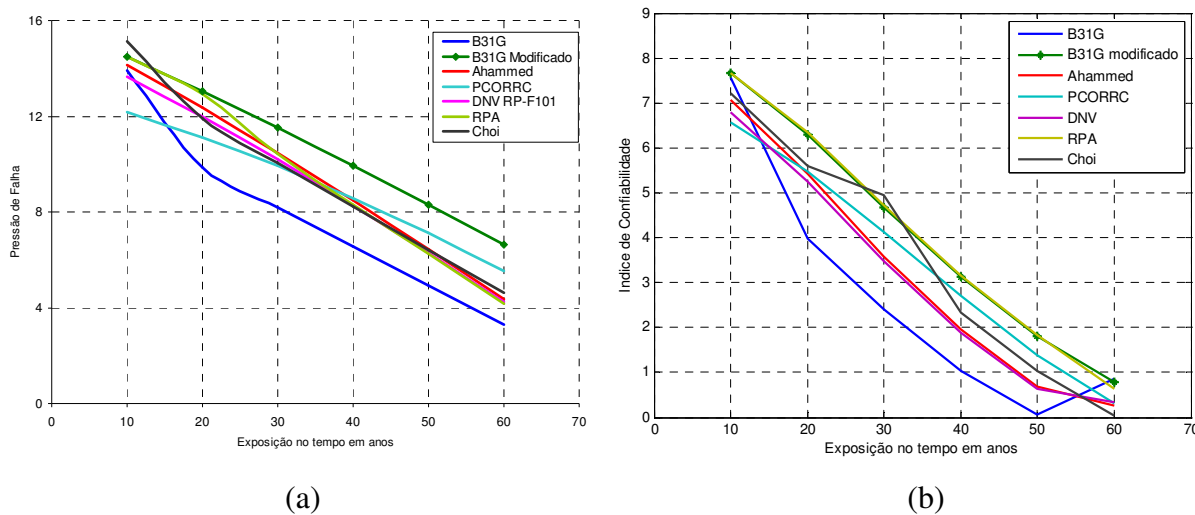
Com isso calcula-se a pressão de falha e o índice de confiabilidade para defeitos curtos, longos, transitórios e para as sete amostras apresentadas por Choi (2003) conforme descrito a seguir.

#### 6.4.1.1 Defeitos Curtos



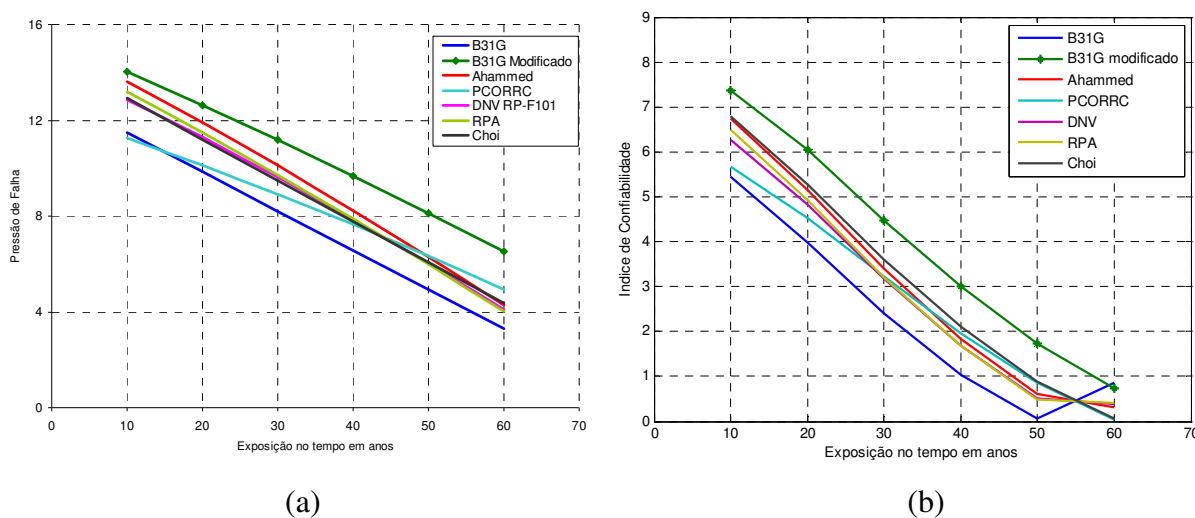
**Figura 6.25** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.1.2 Defeitos Transitórios



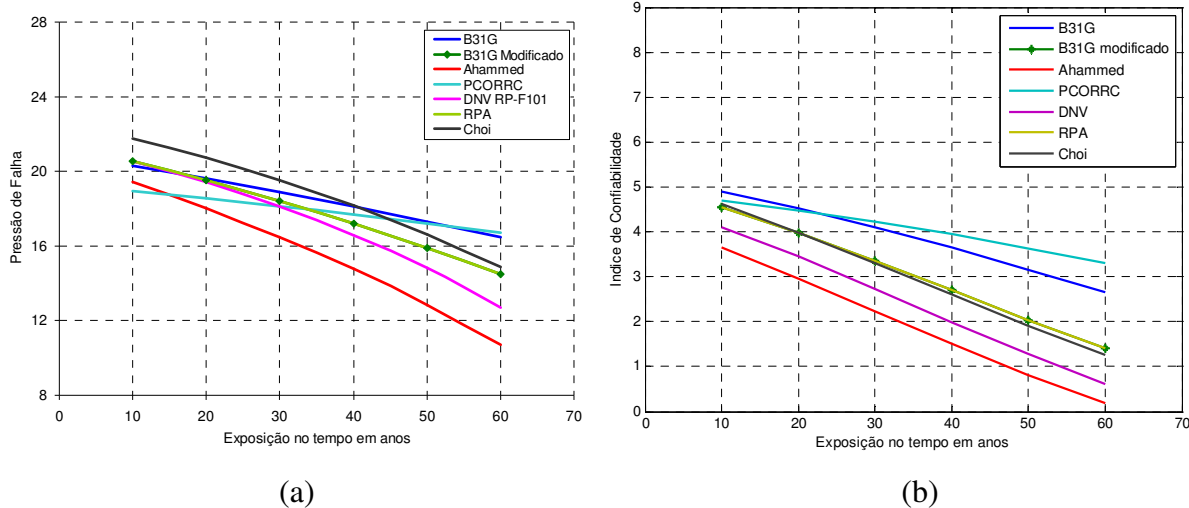
**Figura 6.26** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.1.3 Defeitos Longos



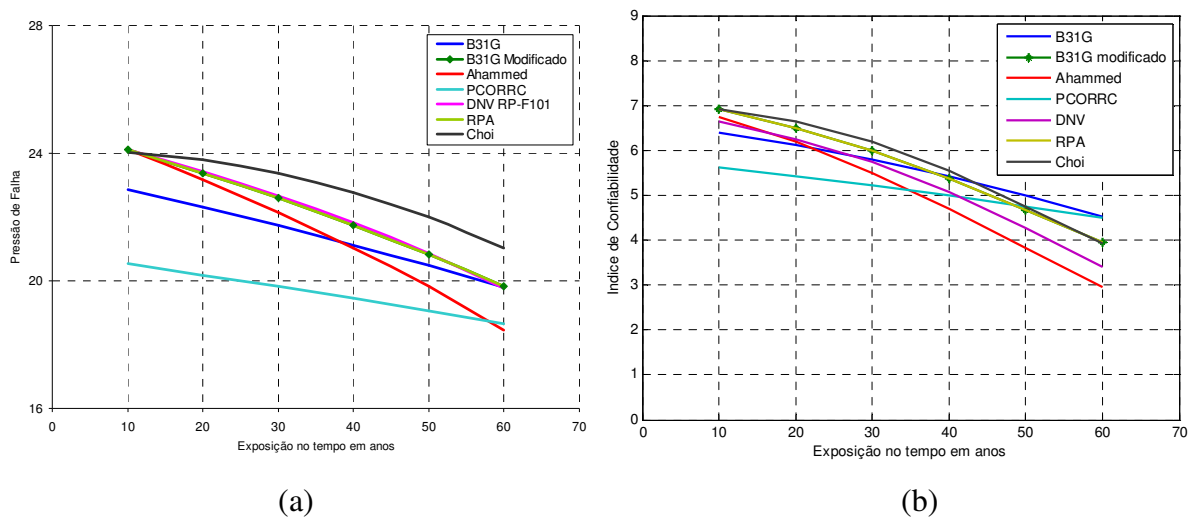
**Figura 6.27** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

#### 6.4.1.4 Espécimes DB / CB / CC



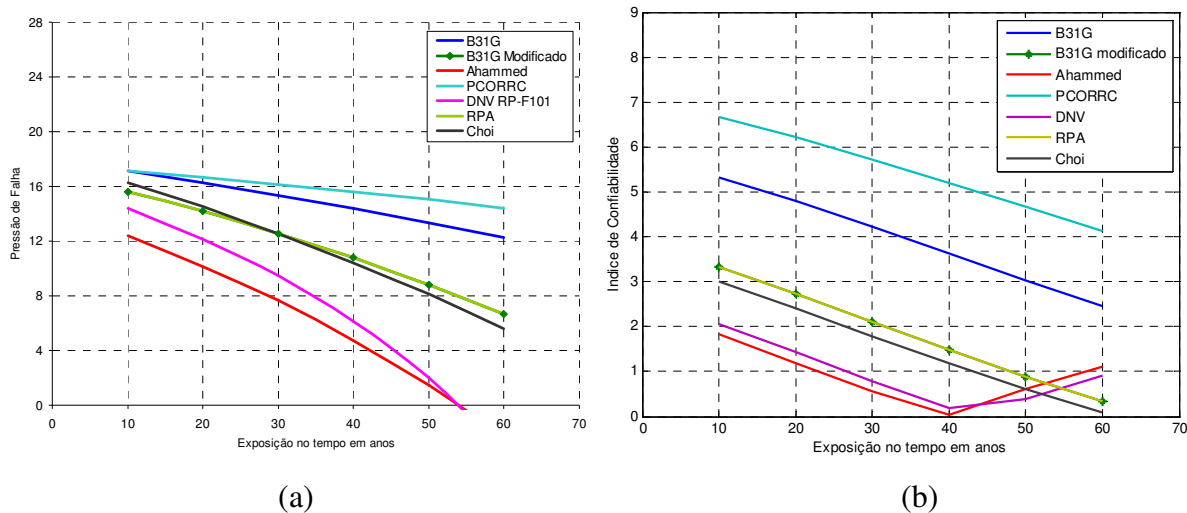
**Figura 6.28** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

#### 6.4.1.5 Espécime DA



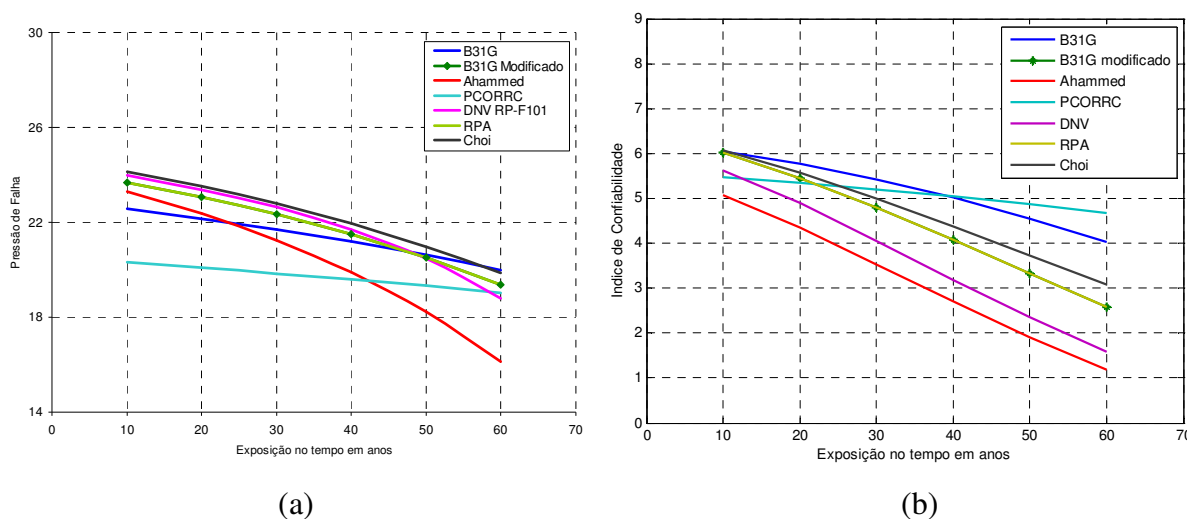
**Figura 6.29** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.1.6 Espécime DC



**Figura 6.30** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

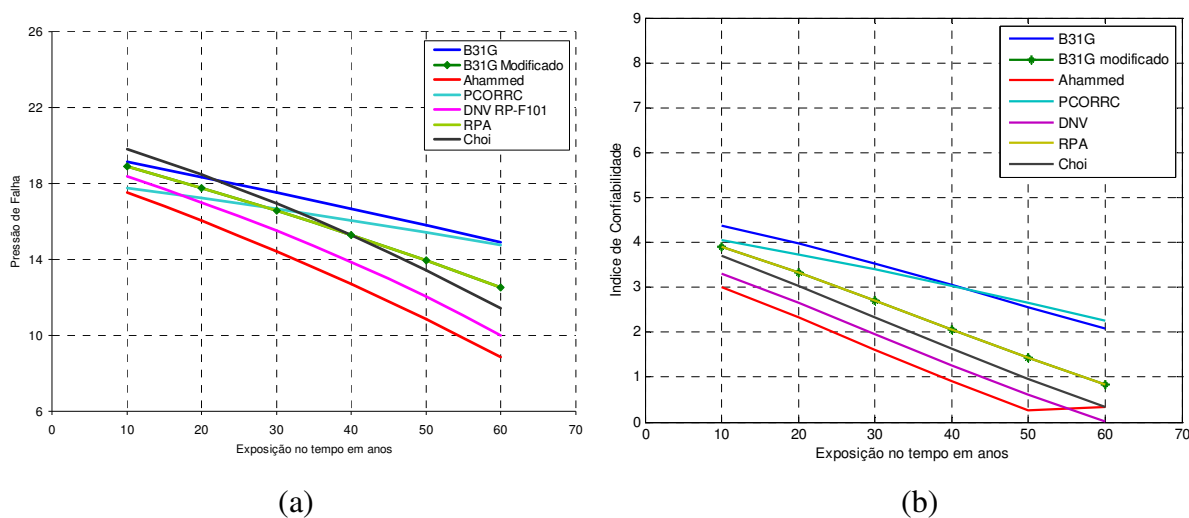
### 6.4.1.7 Espécime LA



**Figura 6.31** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos



### 6.4.1.8 Espécime LC



**Figura 6.32** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

Portanto analisando comparativamente os gráficos com os resultados de pressão de falha pode-se concluir que esta incerteza de modelagem diminui a variabilidade dos resultados, porém em alguns casos com a evolução do defeito a variabilidade entre os métodos começa a aumentar.

## 6.4.2 Incerteza de modelagem em equação de regressão baseada nos resultados de Choi (2003)

No item 6.4.1 foi efetuada uma análise de pressão de falha e de índice de confiabilidade a utilizando a **equação (6.8)** onde a incerteza de modelagem foi definida como uma constante.

Portanto com o objetivo de diminuir a variabilidade dos resultados obtidos pela incerteza de modelagem independente do comprimento e da profundidade do defeito, efetua-se uma análise onde a incerteza de modelagem será uma equação dependente do comprimento e profundidade do defeito. Esta equação é dada por:

$$IM = C_1 + C_2 \cdot d + C_3 \cdot a \quad (6.10)$$

onde  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são constantes determinadas através de regressão linear.

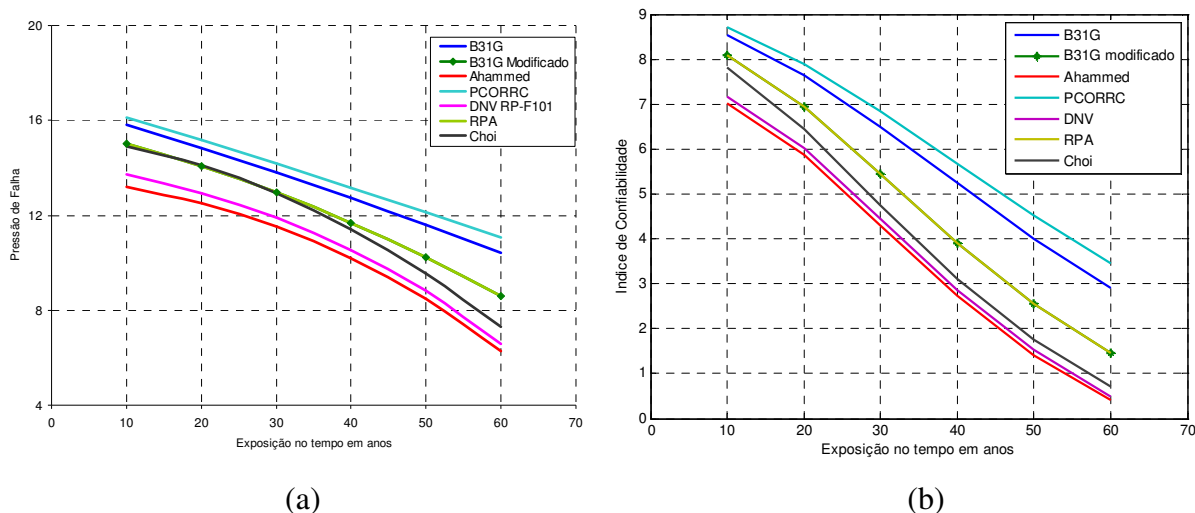
Portanto com os valores de **Tabela 6.7** calcula-se a incerteza de modelagem utilizando a **equação (6.9)** para cada um dos casos para cada um dos métodos. Com este resultado efetua-se uma regressão linear para definir as constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  para cada um dos métodos conforme a **Tabela 6.9**.

**Tabela 6.9** – Constantes para o cálculo da incerteza de modelagem com base nos dados de Choi(2003)

	Método B31G	B31G Modificado	Ahammed	Método RPA	DNV RP-F101	Método PCORRC	Choi
$C_1$	1,24E+00	1,03E+00	7,53E-01	1,03E+00	8,08E-01	1,17E+00	1,16E+00
$C_2$	-6,51E-03	1,22E-02	4,92E-02	1,22E-02	2,16E-02	-1,65E-02	6,92E-03
$C_3$	-2,18E-04	1,12E-04	4,76E-04	1,12E-04	3,15E-04	-3,42E-04	-4,05E-05

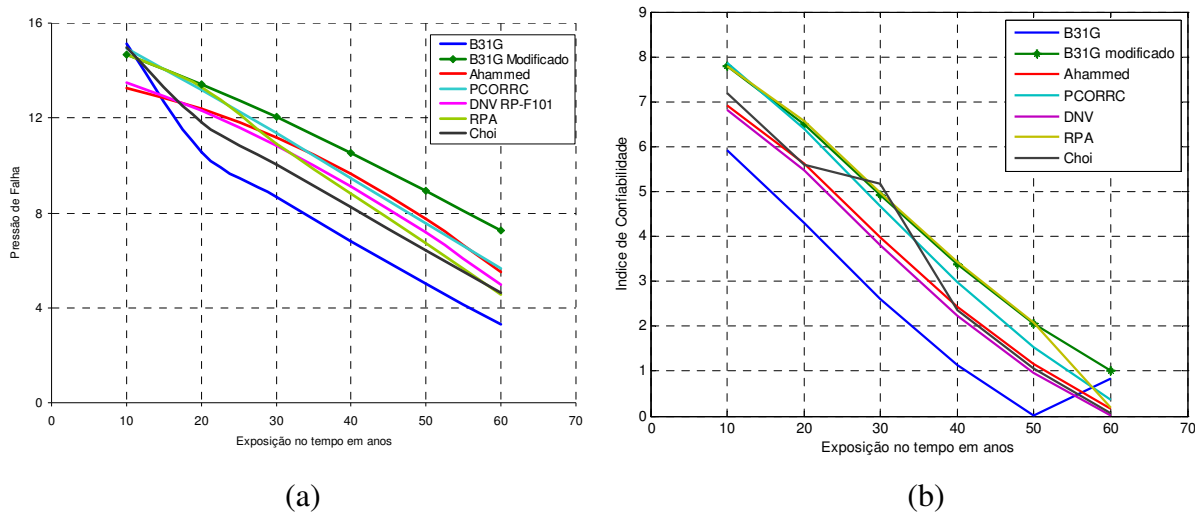
Com isso calcula-se a incerteza de modelagem para cada caso em função do comprimento de defeito e da profundidade do defeito pela **equação (6.10)** e em seguida utiliza-se da **equação (6.8)** para a análise de confiabilidade. Com isso se obtêm os resultados a seguir.

#### 6.4.2.1 Defeitos Curtos



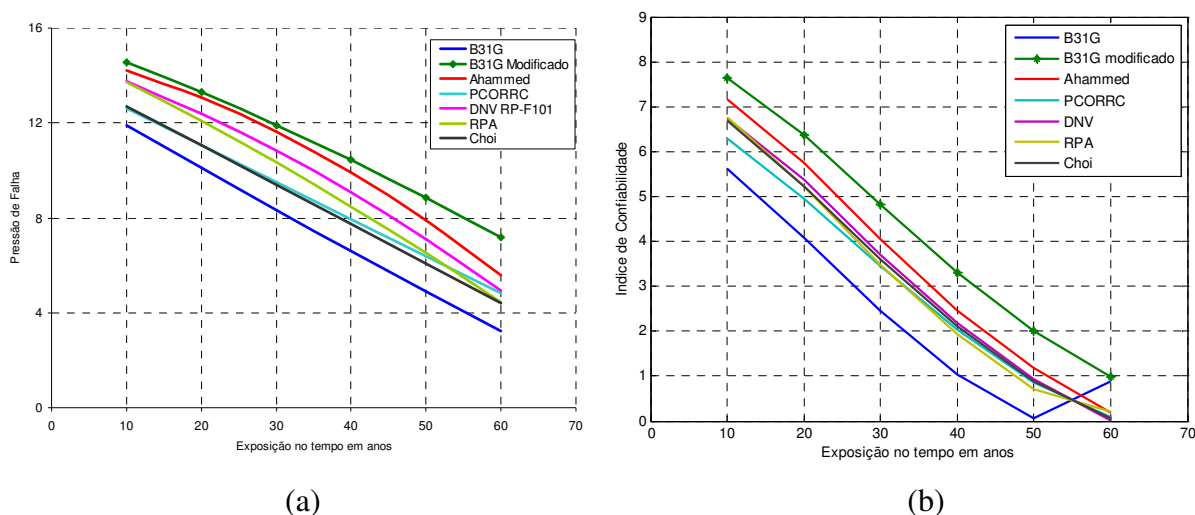
**Figura 6.33** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.2.2 Defeitos Transitórios



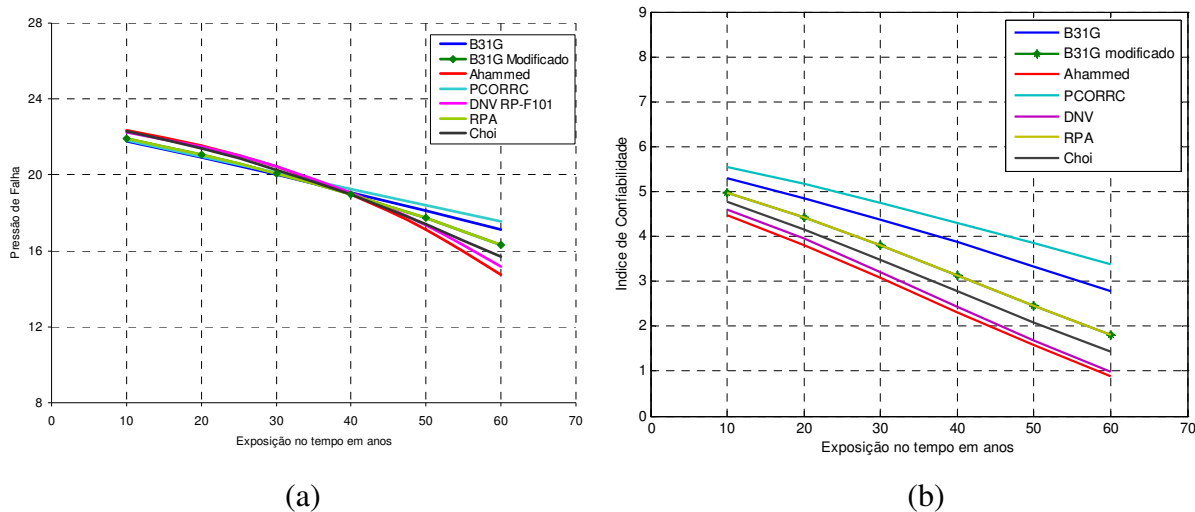
**Figura 6.34** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.2.3 Defeitos Longos



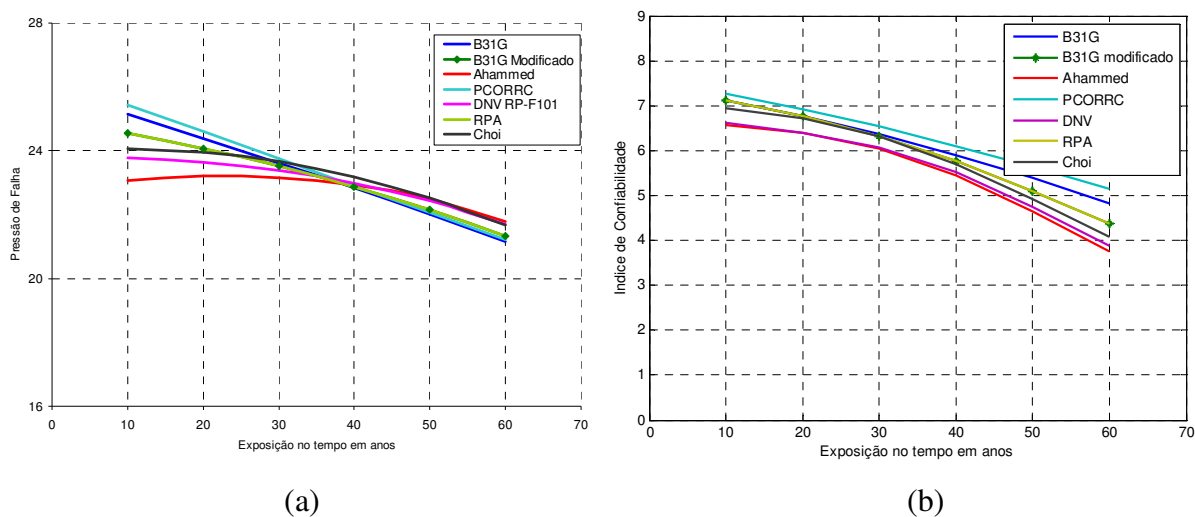
**Figura 6.35** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

#### 6.4.2.4 Espécimes DB / CB / CC



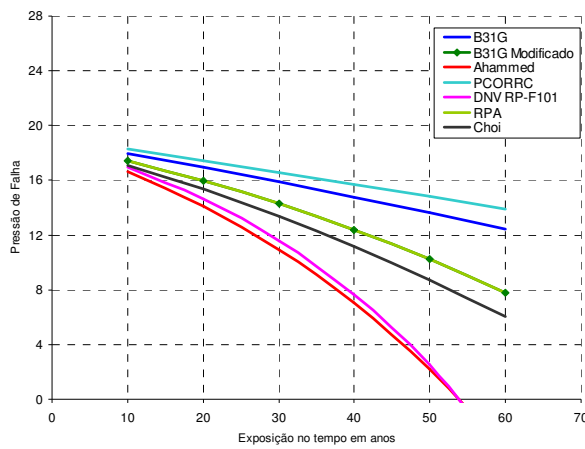
**Figura 6.36** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

#### 6.4.2.5 Espécime DA

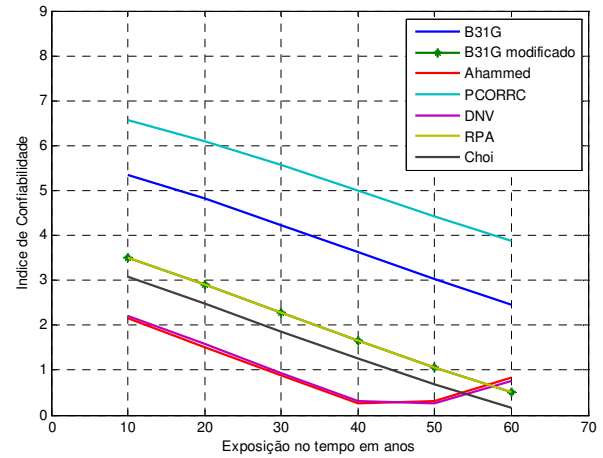


**Figura 6.37** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.2.6 Espécime DC



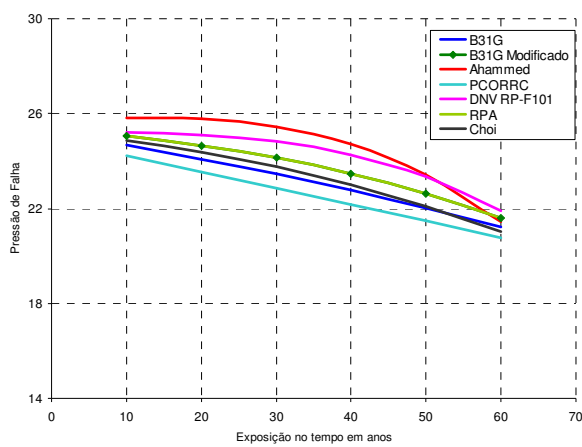
(a)



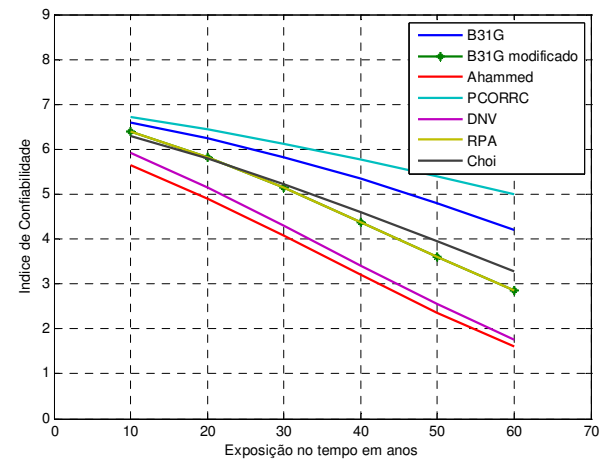
(b)

**Figura 6.38** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.2.7 Espécime LA



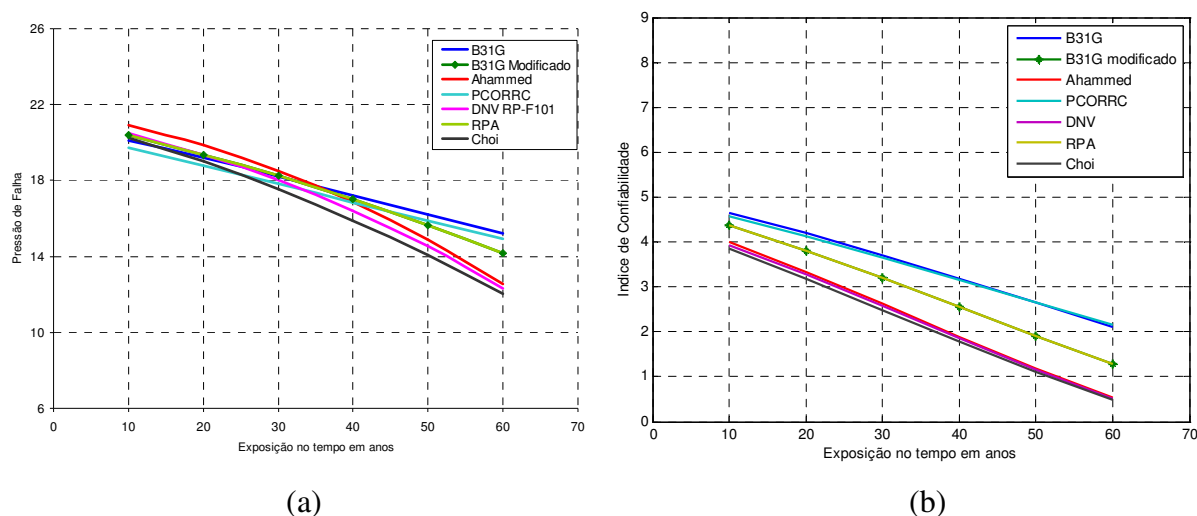
(a)



(b)

**Figura 6.39** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.2.8 Espécime LC



**Figura 6.40** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.3 Incerteza de modelagem em equação de regressão baseada nos resultados de Valentini (2006)

Nota-se nos resultados do item 6.4.2 que os espécimes com defeitos definidos por Choi (2003) tiveram a variabilidade reduzida na pressão de falha, porém para os defeitos curtos, transitórios e longos a redução não foi efetiva. Isso se deve basicamente pois Choi (2003) apresentou resultados experimentais apenas para defeitos curtos. Para melhorar esta aproximação, utiliza-se os espécimes apresentados por Valentini (2006) que analisou os 7 espécimes analisados por Choi (2003) e mais os 8 espécimes com defeitos longos que possuem as características descritas na **Tabela 6.10**.

Portanto com o intuito de melhorar o cálculo do fator de incerteza efetua-se a mesma análise de regressão descrita no item 6.4.2, porém utilizando os resultados obtidos por Valentini (2006) através da análise dos espécimes utilizando o método dos elementos finitos, conforme apresentado a **Tabela 6.11**. Portanto com os valores de **Tabela 6.11** calcula-se a incerteza de modelagem utilizando a **equação (6.9)** para cada um dos casos. Com este resultado efetua-se uma regressão linear para definir as constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  para cada um dos métodos conforme a **Tabela 6.12**.

**Tabela 6.10** – Característica dos espécimes descritos por Valentini (2006).

Espécime	Dados apresentados por Valentini (2006)					Dados definidos no presente trabalho				
	d0 (mm)	D (mm)	a0 (mm)	t (mm)	c (mm)	Pa (Mpa)	Rd (mm/ano)	Ra (mm/ano)	$\sigma_y$ (Mpa)	$\sigma_u$ (Mpa)
L1	3,9	762	446,0	13	240	10	0,1	0,1	467	573
L2	3,9	762	589,0	13	240	10	0,1	0,1	467	573
L3	3,9	762	704,0	13	240	5	0,1	0,1	467	573
L4	3,9	762	996,0	13	240	10	0,1	0,1	467	573
L5	9,1	762	446,0	13	240	10	0,1	0,1	467	573
L6	9,1	762	589,0	13	240	10	0,1	0,1	467	573
L7	9,1	762	704,0	13	240	10	0,1	0,1	467	573
L8	9,1	762	996,0	13	240	10	0,1	0,1	467	573

**Tabela 6.11** – Dados de pressão de falha utilizados para o cálculo da incerteza de modelagem

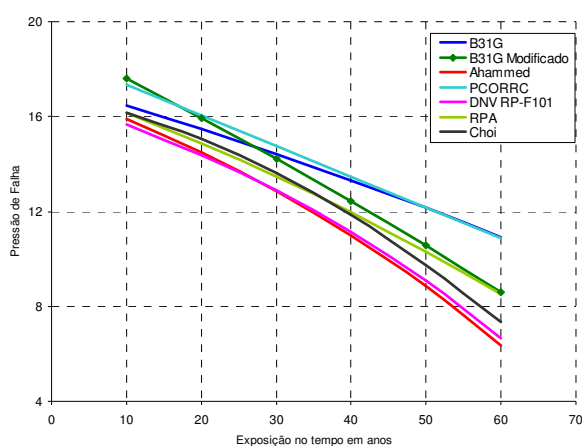
Espécime	EF Casca Valentini (MPa)	Método B31G (MPa)	B31G Modificado (MPa)	Ahammed (MPa)	Método RPA (MPa)	DNV RP-F101 (MPa)	Método PCORRC (MPa)	Choi (MPa)
DA	25,41	21,60	22,16	21,65	22,16	24,62	24,65	20,30
DB	22,13	19,17	18,87	17,43	18,87	20,99	22,75	18,35
DC	16,19	16,21	14,37	11,12	14,37	14,69	20,59	13,74
LA	24,49	21,34	21,78	20,92	21,78	24,48	24,39	20,38
LC	20,64	18,08	17,39	15,75	17,39	18,76	21,34	16,72
CB	22,62	19,17	18,87	17,43	18,87	20,99	22,75	18,35
CC	21,10	19,17	18,87	17,43	18,87	20,99	22,75	18,35
L1	17,34	12,27	14,69	14,00	14,68	15,67	16,42	13,17
L2	17,07	12,27	14,47	13,75	13,73	15,25	15,83	12,79
L3	16,76	12,27	14,37	13,64	13,53	15,03	15,44	12,49
L4	16,53	12,27	14,18	13,42	13,24	14,70	14,75	11,73
L5	8,51	5,26	8,92	6,86	8,87	8,07	11,58	6,55
L6	7,91	5,26	8,58	6,54	6,56	7,49	10,19	6,28
L7	7,64	5,26	8,43	6,40	6,28	7,21	9,32	6,06
L8	7,43	5,26	8,15	6,15	5,94	6,81	7,81	5,50

**Tabela 6.12** – Constantes para o cálculo da incerteza de modelagem com base nos dados de Valentini(2006)

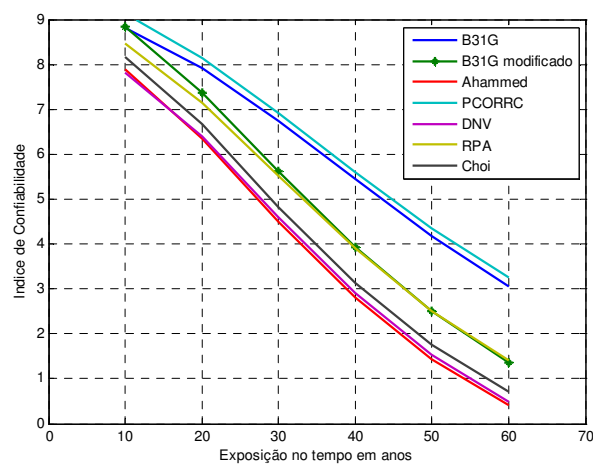
	Método B31G	B31G Modificado	Ahammed	Metodo RPA	DNV RP-F101	Metodo PCORRC	Choi
C <sub>1</sub>	1,16E+00	1,40E+00	1,17E+00	1,17E+00	1,06E+00	1,26E+00	1,27E+00
C <sub>2</sub>	-5,68E-03	-2,52E-02	1,15E-02	-6,00E-03	-2,33E-03	-3,63E-02	-1,06E-02
C <sub>3</sub>	3,76E-04	-2,49E-04	-2,62E-05	1,16E-04	6,90E-05	-5,99E-05	1,73E-04

Com isso calcula-se a incerteza de modelagem para cada caso em função do comprimento e da profundidade do defeito pela **equação (6.10)** e em seguida utiliza-se da **equação (6.8)** para a análise de confiabilidade. Com isso se obtêm os resultados a seguir.

### 6.4.3.1 Defeitos Curtos



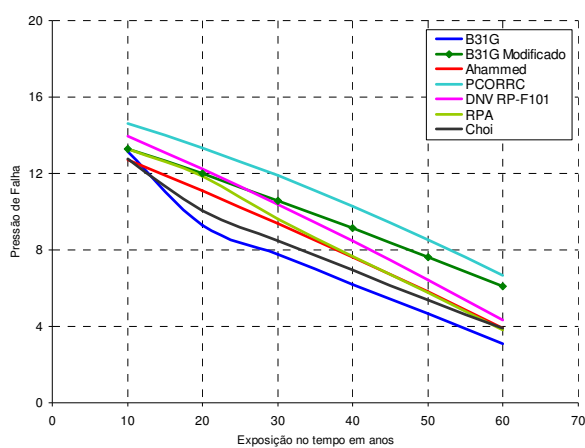
(a)



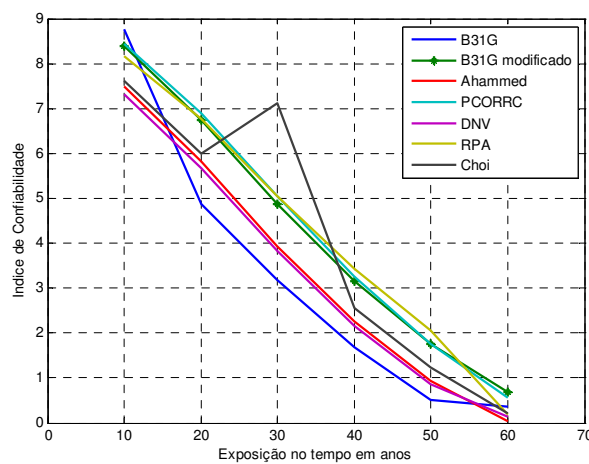
(b)

**Figura 6.41** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.3.2 Defeitos Transitórios



(a)

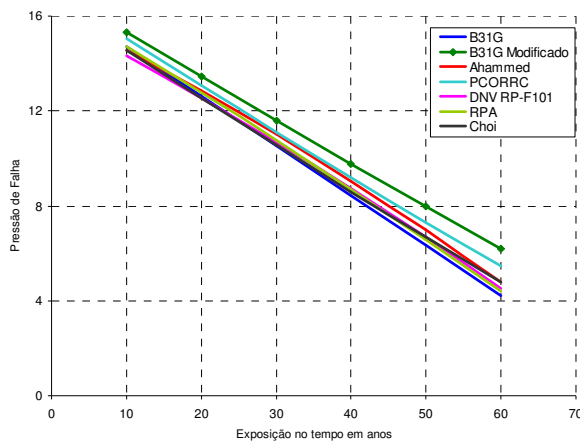


(b)

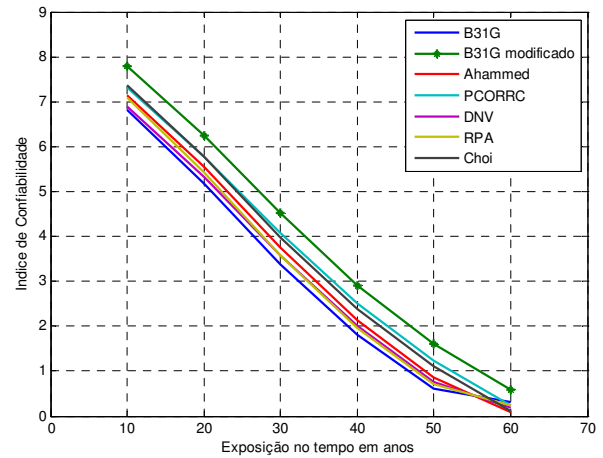
**Figura 6.42** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos



### 6.4.3.3 Defeitos Longos



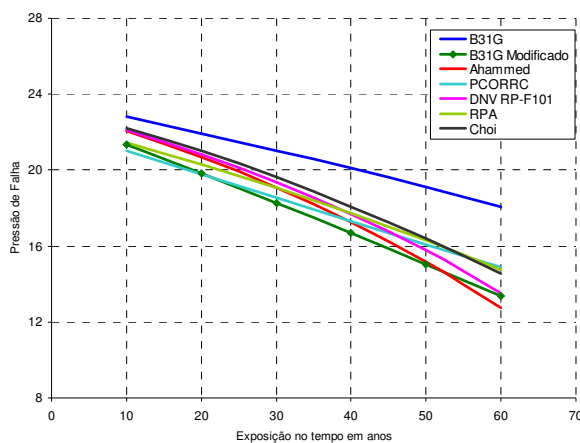
(a)



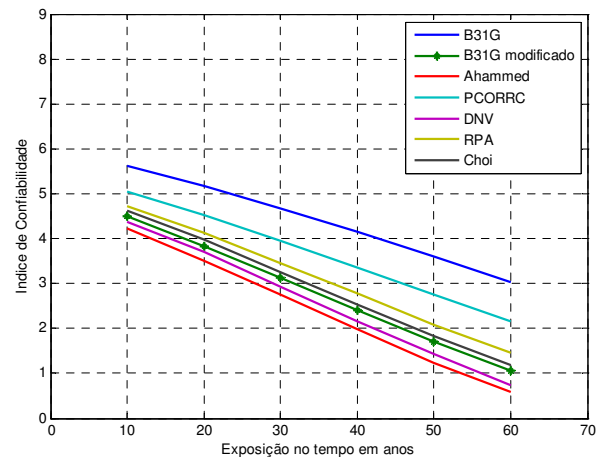
(b)

**Figura 6.43** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.3.4 Espécimes DB / CB / CC



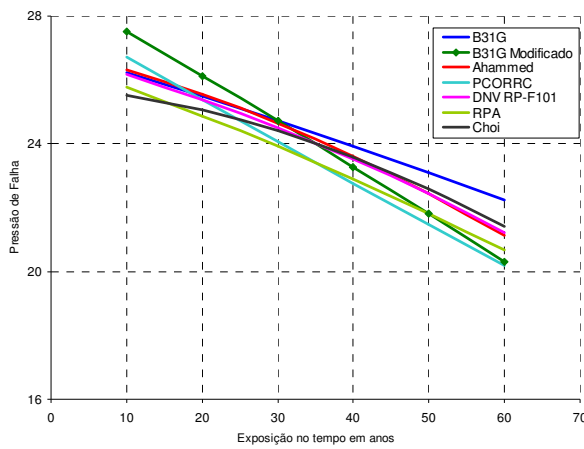
(a)



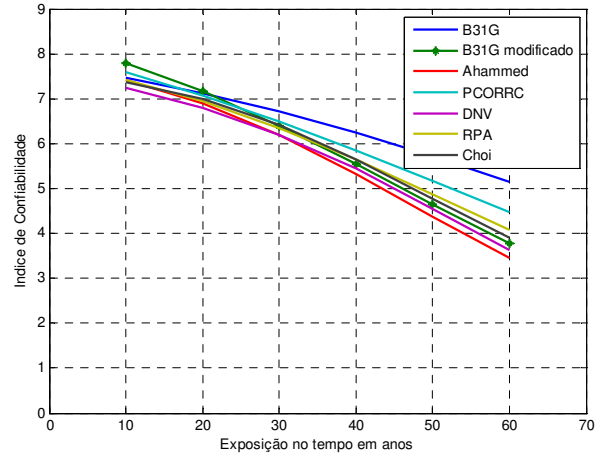
(b)

**Figura 6.44** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.3.5 Espécime DA



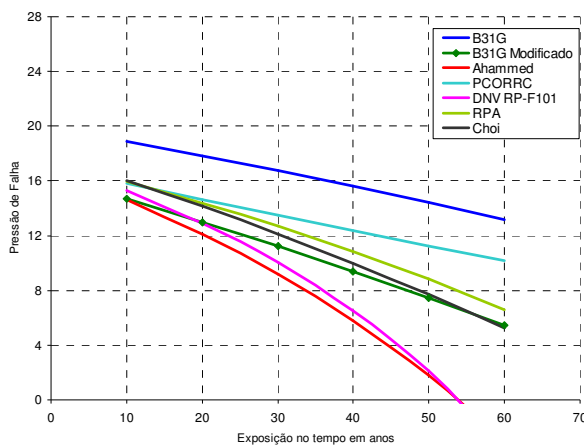
(a)



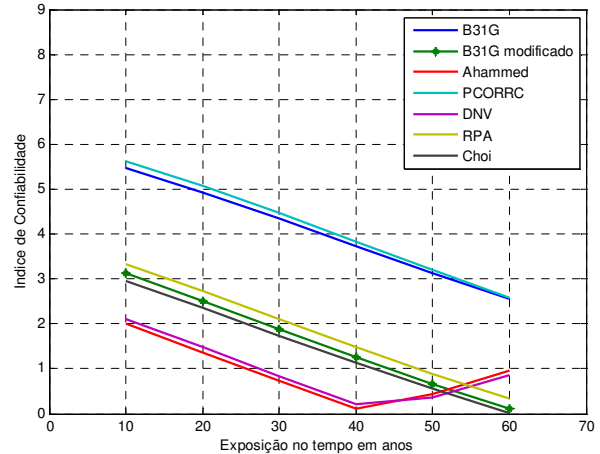
(b)

**Figura 6.45** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.3.6 Espécime DC



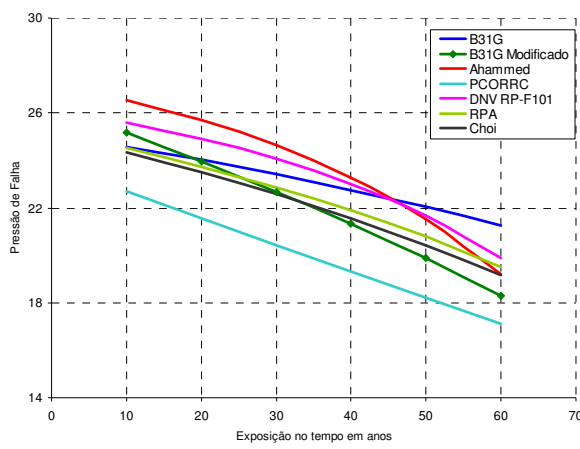
(a)



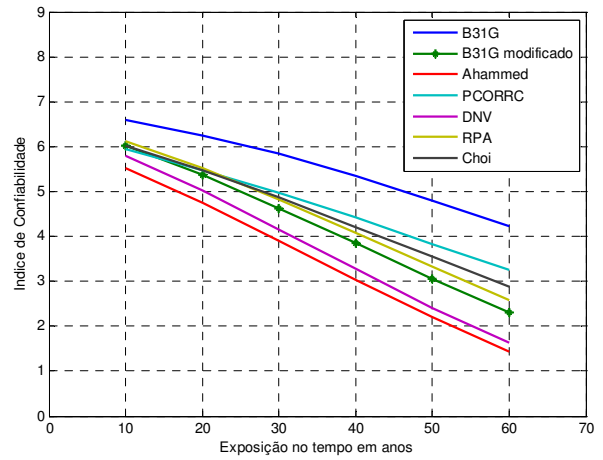
(b)

**Figura 6.46** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.3.7 Espécime LA



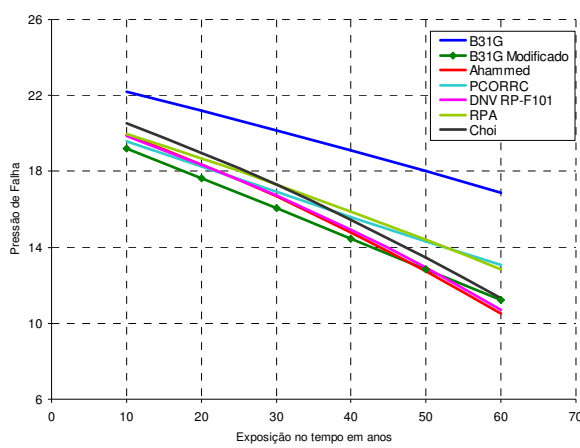
(a)



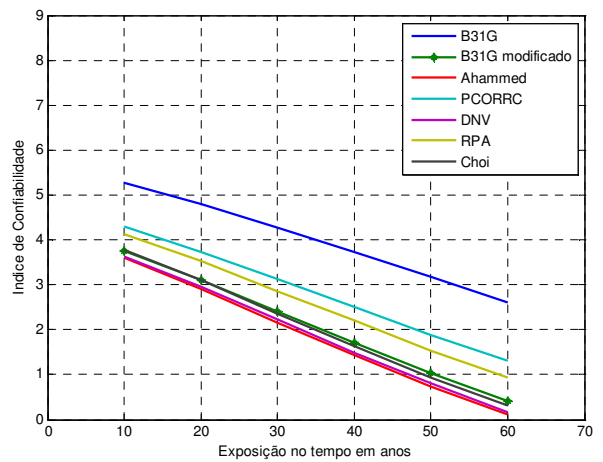
(b)

**Figura 6.47** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

### 6.4.3.8 Espécime LC



(a)



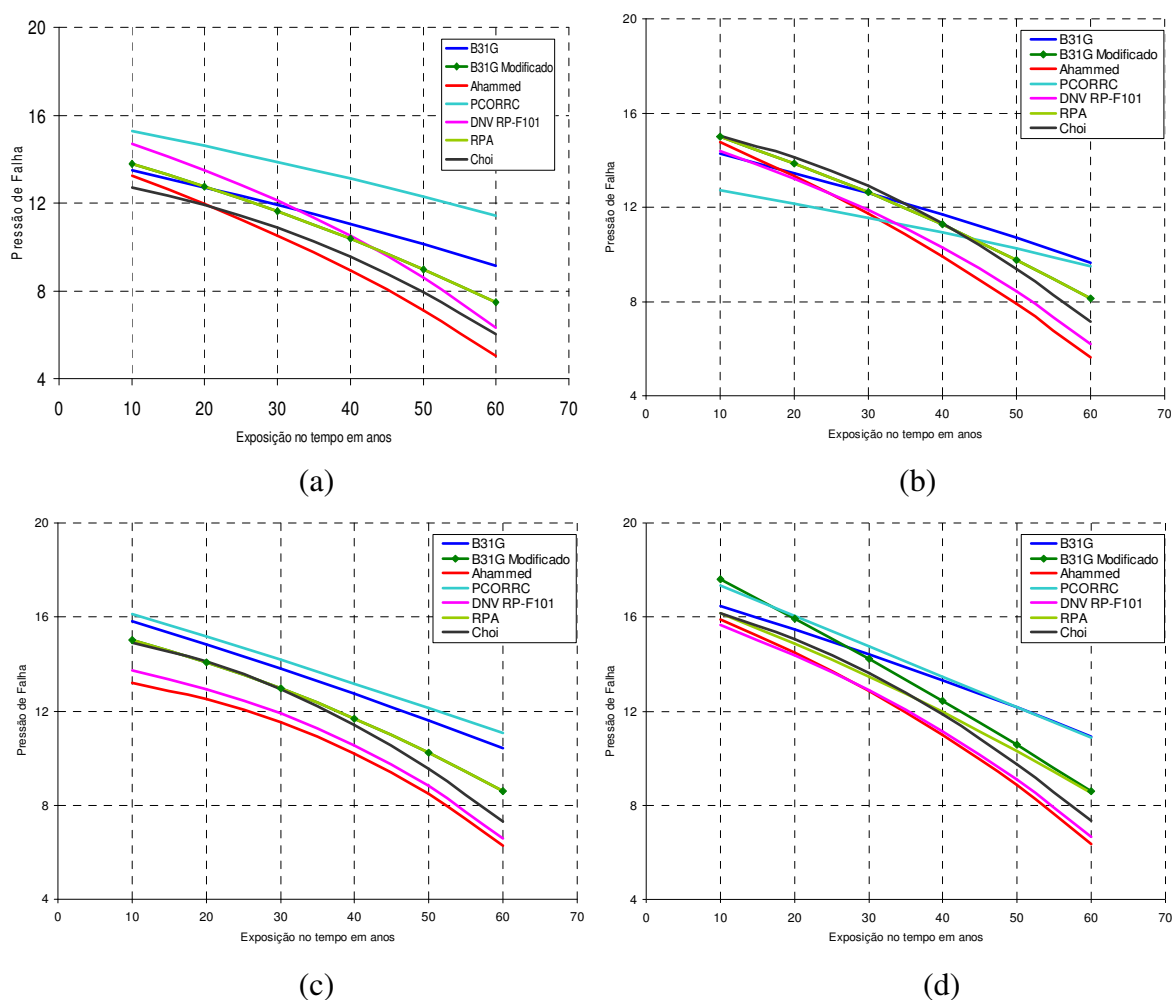
(b)

**Figura 6.48** – (a) Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos, (b) Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos

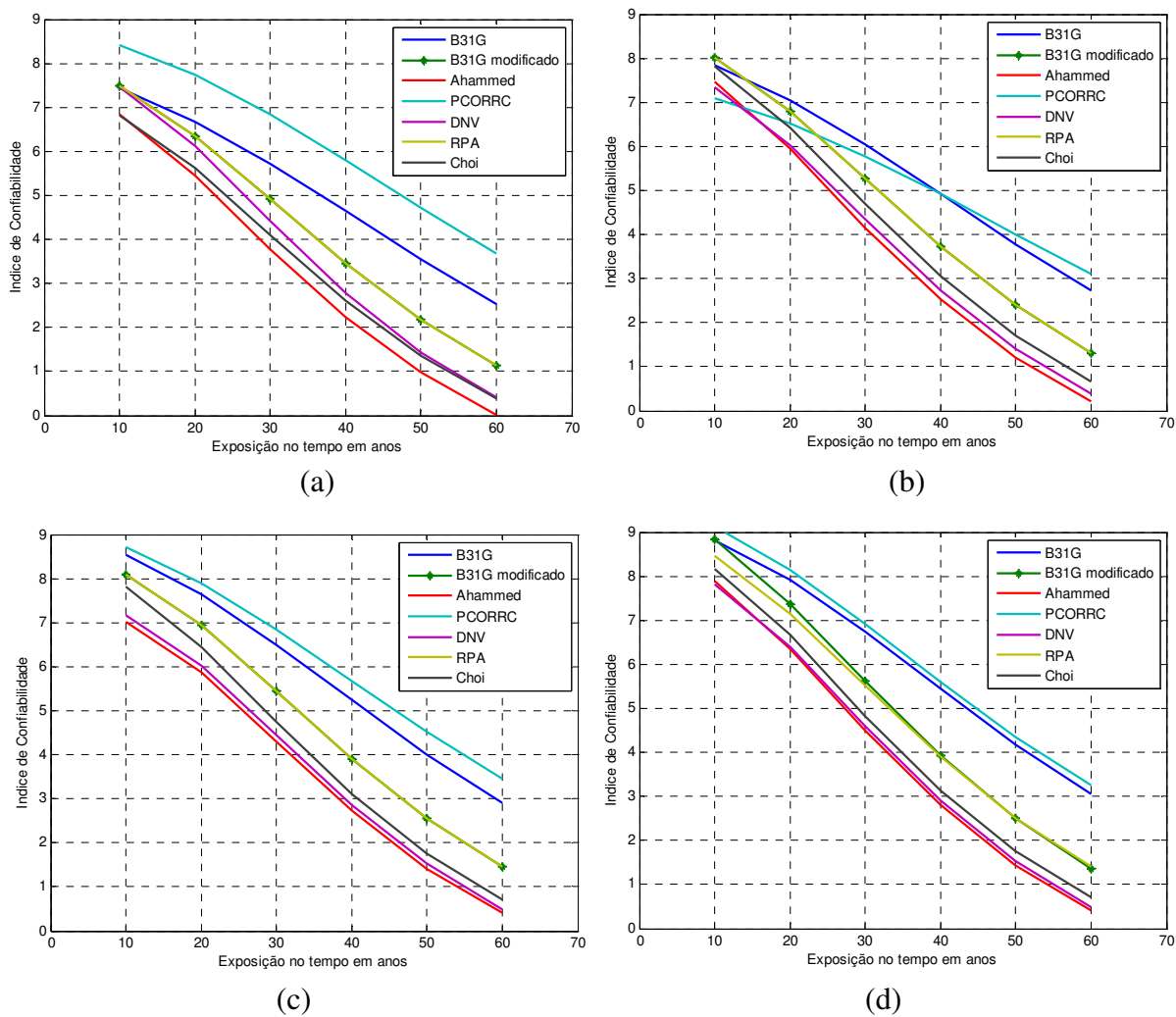
## 6.5 Comparativo de resultados devido a Incerteza de Modelagem

Com o objetivo de auxiliar na visualização e com isso facilitar a interpretação dos resultados, é realizado nesta seção um comparativo dos resultados obtidos nas seções 6.3 e 6.4 devido a utilização da incerteza de modelagem.

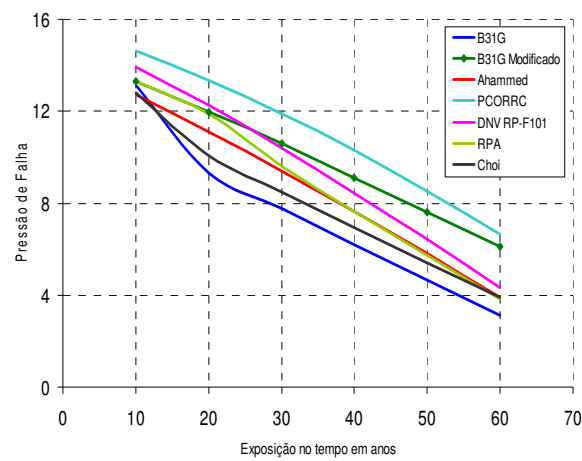
Este comparativo utiliza os resultados previamente apresentados de pressão de falha e índice de confiabilidade para defeitos curtos, transitórios e longos. Porém, nesta seção os gráficos dispostos lado a lado permitindo a visualização do impacto da incerteza de modelagem no resultado dos métodos semi-empíricos.



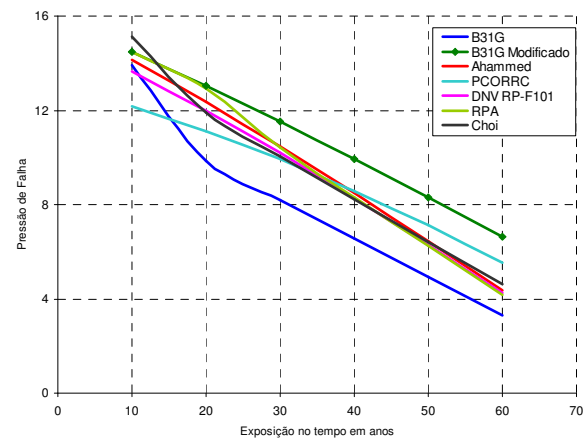
**Figura 6.49** - Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini.



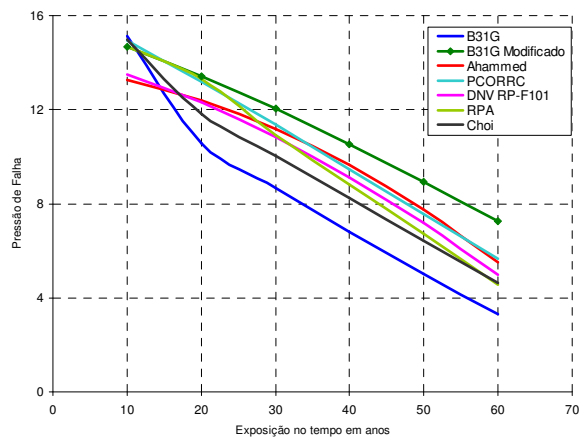
**Figura 6.50** – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos curtos, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini.



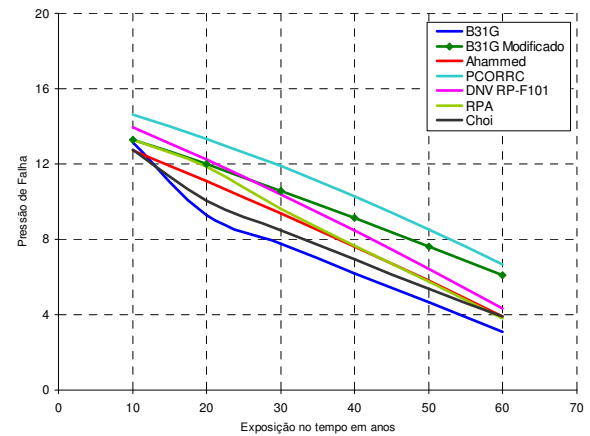
(a)



(b)

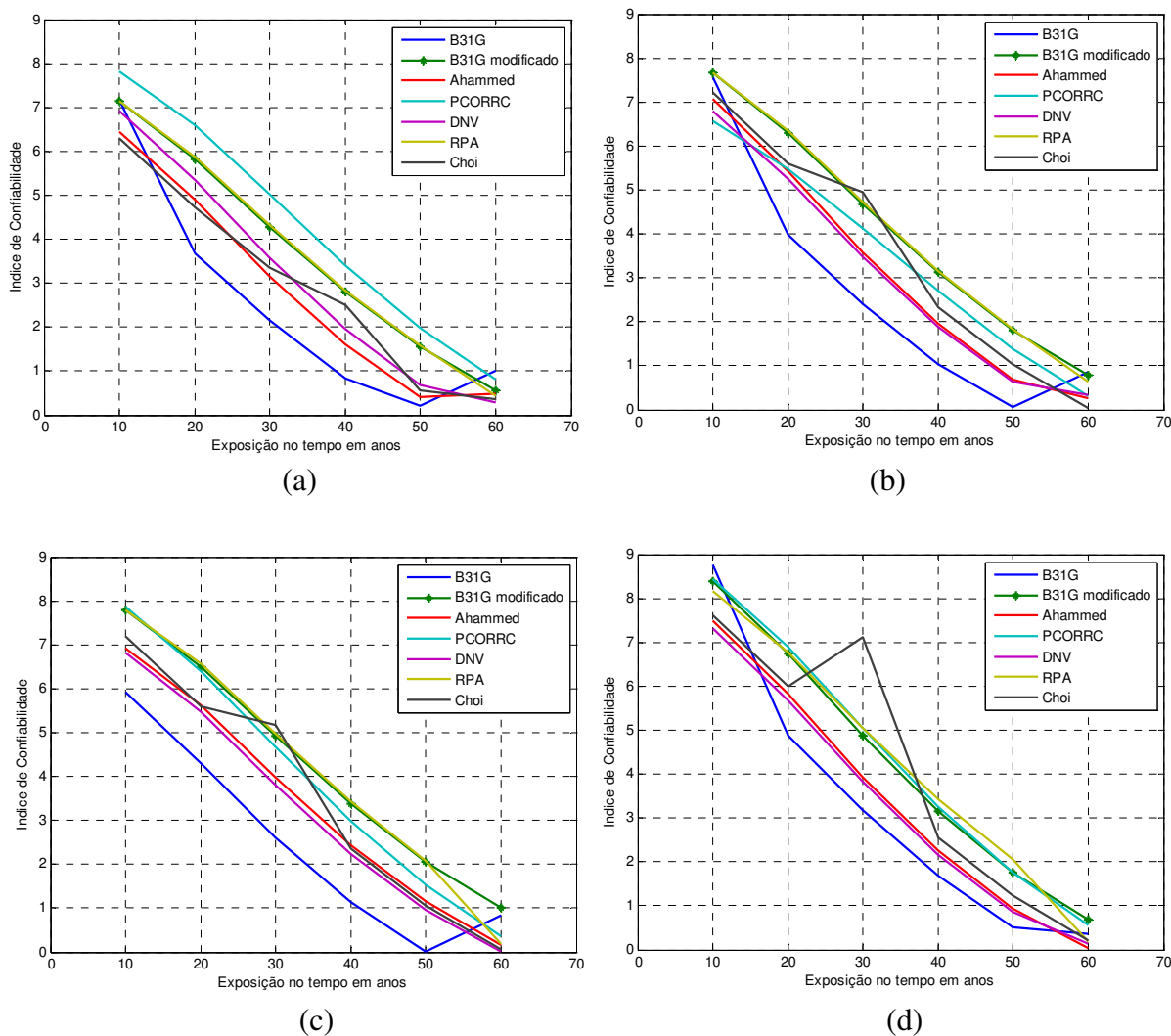


(c)

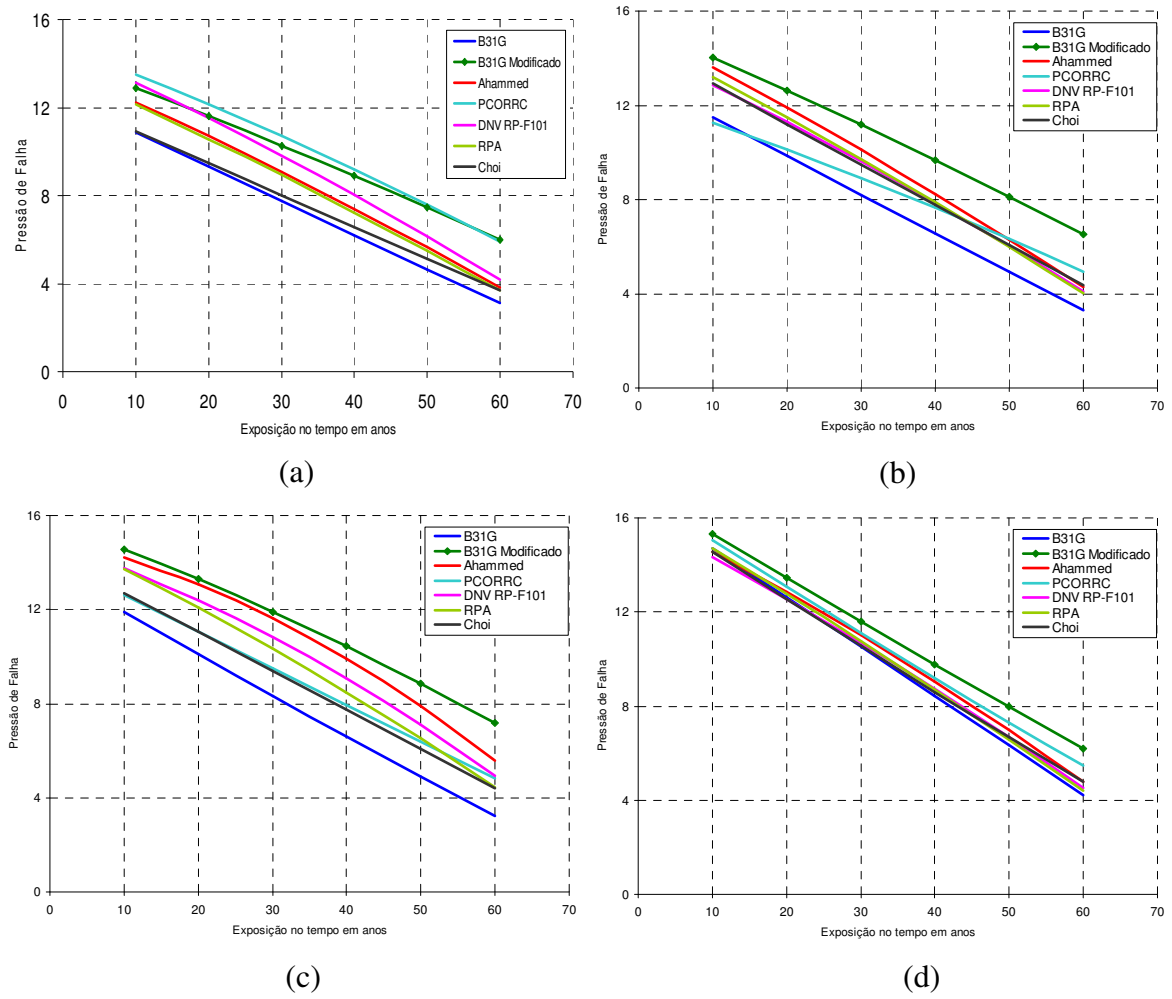


(d)

**Figura 6.51** - Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini.

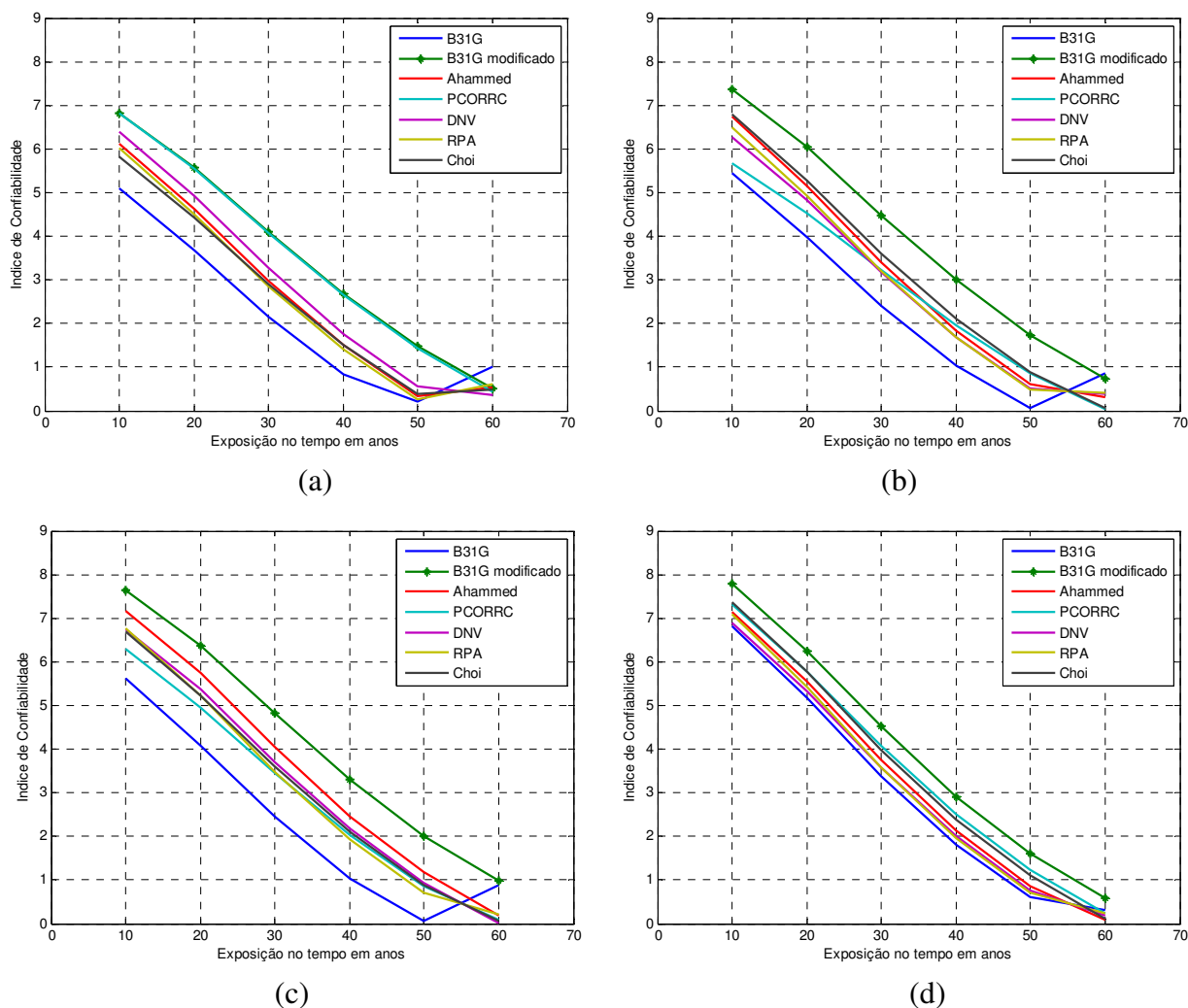


**Figura 6.52** – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos transitórios, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini.



**Figura 6.53** - Pressão de falha versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini.





**Figura 6.54** – Índice de confiabilidade versus período de exposição para os métodos semi-empíricos para defeitos longos, (a) Resultado original sem IM, (b) Resultado utilizando-se IM de uma constante, (c) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Choi, (d) Resultado utilizando-se IM através da regressão dos dados de Valentini.

Analisando as **figuras 6.49 a 6.54** é possível concluir que a adição da incerteza de modelagem, como um fator de correção, diminui a variabilidade entre os métodos semi-empíricos e ainda permite evitar casos onde o valor calculado pode assumir valores contra a segurança como é o caso do método PCORRC. Entre as três opções de fatores de correção a que apresenta melhores resultados em um contexto geral é a regressão baseada nos dados de Valentini (2006).

## 7 CONCLUSÃO

No início da pesquisa, traçou-se como objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia de análise em problemas de dutos com defeitos causados por corrosão, baseado nos conceitos de confiabilidade estrutural, com a utilização do método iterativo de primeira ordem e segundo momento, denominado FORM (*“First Order Reliability Method”*) para avaliar a resistência residual considerando as diversas incertezas inerentes a cada uma das variáveis aleatórias, o qual foi atingido conforme se observa no desenvolvimento da pesquisa.

Para que este objetivo fosse alcançado foi realizado um estudo abrangente sobre confiabilidade estrutural, aplicado a dutos com defeitos causados por corrosão e foi aprofundado o conhecimento sobre o método analítico FORM, o qual serviu como ferramenta principal para a solução do problema proposto.

Portanto, foi definido um procedimento de análise utilizando o método analítico FORM (*“First Order Reliability Method”*), o qual foi implementado em ambiente MATLAB e teve o seu desempenho analisado através da comparação com um exemplo descrito na literatura, obtendo-se os resultados desejados. Para as análises realizadas foram considerados defeitos de corrosão ativa, onde é possível visualizar a evolução do defeito e conseqüentemente a perda de resistência do duto. Isso proporciona que os resultados obtidos através de análise de confiabilidade estrutural sejam de grande importância para o planejamento de inspeção e de manutenção de uma dutovia.

É importante lembrar que todas as análises foram realizadas utilizando 8 variáveis aleatórias que são, profundidade inicial do defeito, diâmetro da tubulação, comprimento inicial do defeito, pressão do fluido, tensão de escoamento ou tensão última do material do duto, espessura da parede da tubulação, taxa de corrosão radial e taxa de corrosão longitudinal.

Realizou-se uma análise do fator de importância de cada uma das variáveis onde é possível concluir que as variáveis aleatórias que apresentaram um fator de importância baixo, tais como a taxa de corrosão longitudinal, o comprimento inicial do defeito e a taxa de corrosão longitudinal, poderiam ser tratadas como variáveis determinísticas na análise de confiabilidade, com isso poupando esforço computacional. É possível avaliar a importância de cada variável aleatória através da análise da perturbação do índice de confiabilidade quando

se varia o coeficiente de variação conforme foi mostrado nas **Figuras 6.3 a 6.10**, permitindo uma relação com o fator de importância calculado.

Com o algoritmo desenvolvido e aplicado em um exemplo da literatura de forma satisfatória, foi seqüência ao desenvolvimento do trabalho onde foi realizada uma análise comparativa entre alguns métodos semi-empíricos em termos determinísticos através da pressão de falha, e de confiabilidade estrutural através cálculo do índice de confiabilidade para cada método. Esta análise foi realizada para 3 exemplos hipotéticos, para defeitos curtos, transitórios e longos, e para as 7 amostras descritas por Choi (2003). Para que a análise fosse possível foram estipulados alguns valores tais como pressão de operação do duto, coeficientes de variação de cada uma das variáveis aleatórias e as funções densidade de probabilidade das variáveis aleatórias. Os valores tomados como base e as funções densidade de probabilidade foram determinados a partir de exemplos apresentados na literatura, tal como Ahammed (1998).

Com os resultados obtidos foi feita uma análise que permite concluir que apesar de todos os métodos semi-empíricos obedecerem a uma mesma tendência, ainda existe uma grande variabilidade dos resultados, entre os métodos, tanto para pressão de falha quanto para o índice de confiabilidade.

Como algumas das análises de confiabilidade realizadas foram sobre os espécimes ensaiados experimentalmente por Choi (2003) para os quais são conhecidas a pressão de falha experimental, com isso é possível verificar que o método PCORRC fornece na grande maioria dos casos valores que estão contra a segurança, ou seja, o valor calculado é superior ao valor de pressão de falha experimental. Os outros casos fornecem valores seguros, porém as aproximações propostas por Ahammed e por Choi produzem resultados muito conservadores.

Outro ponto importante a ser analisado, referente à análise de confiabilidade estrutural, é que a inclusão das incertezas na análise estrutural apresenta influências distintas para cada método. Portanto, não necessariamente o método com maior pressão de falha será o método com maior índice de confiabilidade, isso pode ser verificado nos exemplos hipotéticos de defeitos curtos transitórios e longos, onde a influência das incertezas no método DNV é maior do que nos outros métodos.

Durante o decorrer do trabalho houveram alguns casos onde ocorreu um crescimento ou uma estabilização do índice de confiabilidade quando este assume valores inferiores a unidade. Isso acontece pois a tendência do índice de confiabilidade seria de assumir valores negativos, porém isso não é possível, pois o índice de confiabilidade é calculado através da norma do ponto de projeto no espaço reduzido, que graficamente consiste na distância entre o

ponto de projeto e a origem,. Portanto este crescimento ou estabilização ocorre devido à características matemáticas da formulação do método FORM.

De toda forma prática isso não é um problema para a utilização do método, pois esta divergência ocorre para valores inferiores a unidade e conforme descrito na literatura, quando o índice de confiabilidade assume valores menores do que três, deve-se tomar uma ação para executar o reparo ou substituição do duto.

Dando seqüência ao estudo de confiabilidade, são realizada novas análises introduzindo um fator de correção chamado de incerteza de modelagem, com o intuito de diminuir a variabilidade entre os métodos semi-empíricos Este fator é calculado de três maneiras, a primeira utilizando uma constante baseada nos dados experimentais de Choi (2003), a segunda uma análise de regressão baseada nos dados experimentais de Choi (2003), e por último uma análise de regressão baseado nos dados numéricos apresentados por Valentini (2006). Com o resultados destas análises é possível concluir que a adição do fator de correção diminui a variabilidade entre os métodos semi-empíricos e ainda permite evitar casos onde o valor calculado pode assumir valores contra a segurança como é o caso do método PCORRC.

Entre as três opções de fatores de correção analisadas no presente trabalho, a que apresenta melhores resultados em um contexto geral é a regressão baseada nos dados de análises numéricas de Valentini (2006), pois para esta análise são considerados defeitos curtos e longos.

Portanto, com a metodologia apresentada no presente trabalho, com análises determinísticas e de confiabilidade estrutural para “calibrar” os modelos semi-empíricos através de fatores de correção determinados a partir de resultados experimentais ou de modelos numéricos de elementos finitos, permite concluir que os métodos que apresentam melhores resultados são o DNV, B31G modificado e RPA, pois são os métodos onde os fatores de correção calculados são os mais próximos da unidade e que os resultados apresentam as menores variabilidades. Por causa desse comportamento, deve-se dar preferência a um destes três métodos para o cálculo de pressão e do índice de confiabilidade.

Com base nisto o presente trabalho pode auxiliar na elaboração um plano de inspeção e de manutenção preditiva baseado nos conceitos de confiabilidade estrutural, através da utilização de um procedimento de análise de dados utilizando o método FORM, considerando as incertezas e funções de densidade de probabilidade de cada uma das variáveis aleatórias. Além disso propõe-se um procedimento de análise de resultados utilizando uma incerteza de modelagem.

A seguir são citadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Aplicação do método de confiabilidade desenvolvido em problemas de corrosão envolvendo defeitos complexos, analisados computacionalmente pelo Método dos Elementos Finitos;
- b) Desenvolver um procedimento de análise de confiabilidade estrutural utilizando o método analítico SORM (“Second Order Reliability Method”);
- c) Aplicação do método de confiabilidade estrutural para dutos com diversos pontos de corrosão que interagem entre si;
- d) Realizar estudos baseados em ensaios experimentais com o intuito de caracterizar as funções densidade de probabilidade e os coeficientes de variação de cada uma das variáveis aleatórias envolvidas na análise de confiabilidade estrutural;
- e) Realizar análise computacional utilizando o método dos elementos finitos, para diversas dimensões de defeitos com o intuito de aprimorar a incerteza de modelagem;
- f) Determinar um procedimento de análise de confiabilidade estrutural para dutos com defeitos de corrosão sujeitos a carregamentos combinados;
- g) Aplicação do método de confiabilidade desenvolvido aplicado em outros problemas da mecânica dos sólidos, como vigas, pontes, barragens, entre outros.

## 8 REFERÊNCIAS

ABRACO, Associação Brasileira de Corrosão.

<http://www.abraco.org.br/>

AHAMMED, M., “Probabilistic Estimation of Remaining Life of a Pipeline in the Presence of Active Corrosion Defects”, Int. J. Pres. Ves. Piping, v.75, p. 321-329, 1998.

AHAMMED, M., “Prediction of Remaining Strength of Corroded Pressurized Pipelines”, Int. J. Pres. Ves. Piping, v.71, p.213-217, 1997.

AHAMMED, M.; MELCHERS, R. E., “Reliability Estimation of Pressurised Pipelines subject to Localised Corrosion Defects”, Int. J. Pres. Ves. Piping, v.69, p.267-272, 1996.

ALVES, J. L., “Avaliação Numérica da Capacidade de Carga de Dutos Corroídos”, Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Dissertação de Mestrado, 89p., Rio de Janeiro, 2002.

ANG, A.H.S., TANG, W.H., “Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol.1 – Basic Principles”, New York: John Wiley & Sons, 1975.

ANG, A.H.S., TANG, W.H., “Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol.2 - Decision, Risk and Reliability”, New York: John Wiley & Sons, 1984.

API, "Specification for Line Pipe – Specification 5L", 42th edition, American Petroleum Institute, Washington, 2000.

API, "Weldings of Pipelines and Related Facilities – Standard 1104", 19th edition, American Petroleum Institute, Washington, 1999.

ASME, “Gas Transmission and Distribution Piping Systems - ASME B31.8”, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1995.

ASME, “Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines – A Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping”, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1991.

BARLOW, R. E., PROSCHAN, F., “Mathematical Theory of Reliability”, SIAM, 1996.

BATTELLE, Battelle Science and Technology International.

<http://www.battelle.org>

BENJAMIN, A. C.; VIEIRA, R. D.; FREIRE, J. L. F.; CASTRO, J. T. P., “Burst Tests on Pipeline with Long External Corrosion”, Proc. 2000 International Pipeline Conference – Volume 2, ASME, 2000.

BENJAMIN, A. C.; ANDRADE, E. Q., “Structural Evaluation of Corrosion Defects in Pipelines: Comparison of FE Analyses and Assessment Methods”, Proc. 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISBN 1 880653-62-1, ISSN 1098-6189, Toulon, 2004.

BENJAMIN, A.C.; SOUZA, R.D.; FREIRE, J.L.F.; VIEIRA, R.D.; DINIZ, J.L.C., “Burst Tests on Pipeline Containing Long Real Corrosion Defects”, Proc. 5th International Pipeline Conference, ASME IPC 2004, IPC04-0128, Calgary, 2004.

BENJAMIN, A. C.; ANDRADE, E. Q., “Modified Method for the Assessment of the Remaining Strength of Corroded Pipelines”, Proc. 1st Rio Pipeline Conference & Exposition 2003, IBP413\_03, Rio de Janeiro, 2003.

BENJAMIN, A. C.; ANDRADE, E. Q., “Predicting the Failure Pressure of Pipelines Containing Nonuniform Depth Corrosion Defects Using The Finite Element Method”, Proc. 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2003-37072, Cancun, 2003.

BRANCO, C. A. G., “Mecânica dos Materiais: Teoria e Aplicações”, McGraw Hill, Lisboa, 1989.

CALEYO, F.; et al., “A Study on the Reliability Assesment Methodology for Pipelines with Active Corrosion Defects”, *Int. J. Pres. Ves. Piping*, v.79, p.77-86, 2002.

CHOI, J. B.; GOO, B. K.; KIM, J.C.; et al., “Development of Limit Load Solutions for Corroded Gas Pipelines”, *Int. J. Pres. Ves. Piping*, v.80, p.121-128, 2003.

COSTA, F. A., “Geração Automática e Análise de Modelos de Dutos com Defeitos Causados por Corrosão”, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE, Dissertação de Mestrado, 56p., Recife, 2004.

DER KIUREGHIAN, A.; LIU, P. L., “Structural reliability under incomplete probability information”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Volume 112, No. 1, 1986.

DINIZ, J. L. C., “Resistência de Dutos com Defeitos Usinados”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC/RIO, Dissertação de Mestrado, 97p., Rio de Janeiro, 2002.

DITLEVSEN, O. AND MADSEN, H. O., “Structural Reliability Methods”, Baffins Lane, Chichester: John Wiley & Sons Inc., 1996 URL: <http://www.mek.dtu.dk/staff/od/books.htm>

DITLEVSEN, O., “Principle of Normal Tail Approximation”, *Journal of Engineering Mechanics (ASME)*, Vol. 107, No. EM6, pp. 1191 – 1208, 1981

DNV, “DNV Recommended Practice – DNV–RP–F101 - Corroded Pipelines”, Det Norske Veritas, Norway, 1999.

FERREIRA, L.M.; “Aplicação da Teoria da Confiabilidade na Obtenção de Limites para o Peso de Veículos de Carga em Pontes de Concreto”, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas), São Carlos, 2006.

FREUDENTHAL, A.M., “The Safety of Structures”, *ASCE Transactions*, Vol. 112, pp. 125-129, 1947.

GENTIL, V., “Corrosão”, *Livros Técnicos e Científicos (LTC)*, Rio de Janeiro, 2003.



GOULD, P.L., "Introduction to Linear Elasticity", 2nd ed., Springer, 1994.

GUIMARÃES, A. C. B., "Avaliação Simplificada da Capacidade de Carga de Dutos Corroídos", Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, UFPR, Dissertação de Mestrado, 107p., Curitiba, 2005.

HASOFER, A.M.; LIND, N.C., "Exact and invariant second moment code format", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE. Volume 100, No. EM1, 1974.

HATASHITA, L.S., "Análise de Confiabilidade de Torres de Transmissão de Energia Elétrica Quando Sujeitas a Ventos Fortes via Método Analítico FORM", Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-PR, Dissertação de Mestrado, 112p., Curitiba, 2007.

HIBBELER, R.C., "Mechanics of Materials", 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey, 1997.

KARAMCHANDANI, A., "Structural System Reliability Analysis Methods", Report No. RMS-7, Department of Civil Engineering, Stanford University, USA, 1990.

KIEFNER, J. F.; VIETH, P. H., "A Modified Criterion for Evaluating the Remaining Strength of Corroded Pipe", Final Report on Project PR3-805, Pipeline Research Committee, American Gas Association, 1989.

KIKERMO, F., "Application of Probabilistic Fracture Mechanics to Offshore Structures", Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, 1988.

LEE, J.C., ANG, H.S., "Finite Element Reliability of Stochastic Structures", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10, 1995.

MADSEN, H. O., KRENK, S. AND LINK, N. C., "Methods of Structural Safety", Prentice Hall, New Jersey, 1986

MADSEN, H.O., SKOJONG, R. AND KIKERMO, F., “Probabilistic Fatigue Analysis of Offshore Structures – Reliability Upgrading Through Inspection Results”, Proceedings of International Congress on Integrity of Offshore Structures, Glasgow, 1987.

MADSEN, H.O., SORENSEN, J.D. AND OLESEN, R., “Optimal Inspection Planning for Fatigue Damage of Offshore Structures”, Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Structural Safety and Reliability, San Francisco, 1989.

MELCHERS, R.E., “Structural Reliability: Analysis and Prediction”, John Wiley & Sons, Chichester, 1987; 1999; 2002.

PETROBRÁS.

<http://www2.petrobras.com.br>

PIPEWAY

<http://www.pipeway.com/>

RACKWITZ, R.; FIESSLER, B., “Structural reliability under combined random load sequences Matrix formulation of reliability analysis and reliability based-design”, Computers & Structures, Vol. 9, Issues 5, 1978.

RAMANATHAN, L.V., “Corrosão e seu Controle”, Embracop, São Paulo, 2004.

ROY, S.; et al., “Numerical Simulations of Full-Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading”, Journal of Pressure Vessel Technology, v.119, p.457-466, 1997.

SMITH, M. Q.; et al., “Full-Scale Wrinkling Tests and Analyses of Large Diameter Corroded Pipes”, Proc. International Pipeline Conference, ASME, v.1, p.543-551, 1998.

STEPHENS, D. R.; LEIS, B. N., “Development of an Alternative Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate-to High-Toughness Pipe”, Proc. International Pipeline Conference, ASME, v.2, p.781-792, 2000.

SAGRILO, L.V.S.; “Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando os Métodos Analíticos FORM E SORM”, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1994.

SOUTHWELL C. R.; BULTMAN J. D.; ALEXANDER A. L., “Corrosion of metals in tropical environments.” Final report of 16-year exposures. Materials Performance, 1976.

THOFT-CHRISTENSEN, P., MUROTSU Y., Application of structural reliability, Berlin: Springer-Verlag, 1986.

TORRES, J.V.S., “Metodologia Probabilística para estudar dutos na Presença de Defeitos de Corrosão”, Rio Pipeline Conference & Exposition 2007, Rio de Janeiro, 2007.

VALENTINI, M.D., “Avaliação dos Métodos Semi-Empíricos para análise de Dutos Corroídos Subsidiado pelo Método dos Elementos Finitos”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-PR, Dissertação de Mestrado, 127p., Curitiba, 2006.

VANHAZEBROUCK, V.M.; MACHADO, R.D.; ABDALLA FILHO, J.E., “Análise de Dutos Corroídos por Meio de Métodos de Confiabilidade Estrutural”, Anais XXIX CILAMCE - Congresso Ibero Latino Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia, Maceió, 2008. (Aceito para Publicação)

YANG, J.S., NIKOLIDIS, E. AND HAFTKA, R.T., “Design of Aircraft Wings Subjected to Gust Loads: A System Reliability Approach”, Computers and Structures, Vol. 6, No. 6, pp. 1057 – 1066, 1990.

WANG, W.; et al., “A New Rupture Prediction Model for Corroded Pipelines under Combined Loadings”, Proc. International Pipeline Conference, ASME, v.1, p.563-572, 1998.