



**José de Jesús Leal Carvajalino**

**Acoplamento de Estados Limites na  
Avaliação da Confiabilidade Estrutural de  
Dutos e Estruturas**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: José Luiz de França Freire

Rio de Janeiro  
Abril de 2010



**José de Jesús Leal Carvajalino**

**Acoplamento de Estados Limites na  
Avaliação da Confiabilidade Estrutural de  
Dutos e Estruturas**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Luiz de França Freire**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Marco Antônio Meggiolaro**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Arthur Martins Barbosa Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Tito Luiz da Silveira**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Jose Antonio da Cunha Ponciano Gomes**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de Abril de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **José de Jesús Leal Carvajalino**

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica na Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colômbia) em 2000. Mestre em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2004.

#### Ficha Catalográfica

Carvajalino, José de Jesús Leal

Acoplamento de estados limites na avaliação da confiabilidade estrutural de dutos e estruturas / José de Jesús Leal Carvajalino ; orientador: José Luiz de França Freire. – 2010.

139 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Confiabilidade estrutural. 3. Distribuição multinormal. 4. Dutos. 5. Corrosão. 6. Mossa. 7. Sulco. I. Freire, José Luiz de França. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para mis papás, Jesús y Antonia, mis hermanos,  
Helio y Francisca, y mis amores, Saori y Kei Antônio.

*“NO PAIN, NO GAIN”*

## Agradecimentos

Ao professor José Luiz de França Freire, pela orientação e por todos os ensinamentos durante todos estes anos, muito obrigado.

Ao CNPq e à CAPES pelos auxílios concedidos.

Aos meus amigos e colegas Marco, Leonardo, José Luiz e Sabrina da PRIMA-7S Integridade Estrutural.

Ao professor Ivan Uribe da UIS-Colombia.

Aos professores da PUC-Rio, da engenharia mecânica e em particular aos professores Arthur Braga, Jaime Castro e Ronaldo Vieira.

Aos professores membros da banca examinadora.

A todos os colegas da pós-graduação, aos do Laboratório de Fotomecânica da PUC-Rio, Leo, Marcos, Gerardo, Jorge, Maira, Gilmar e tantos outros que passaram por aqui.

A todos os funcionários do departamento de engenharia mecânica, pela ajuda brindada durante este tempo, especialmente ao Garcia.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, e seus funcionários em geral.

## Resumo

Carvajalino, José de Jesús Leal; Freire, José Luiz de França. **Acoplamento de Estados Limites na Avaliação da Confiabilidade Estrutural de Dutos e Estruturas**. Rio de Janeiro, 2010. 139 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho são apresentados conceitos usados na avaliação da confiabilidade estrutural com o objetivo de calcular a probabilidade de falha de uma estrutura enquanto ela atende aos fins para os quais foi projetada durante sua vida útil. Uma metodologia de análise de confiabilidade estrutural foi desenvolvida, tendo como foco os dutos de transporte de óleo e gás natural, embora possa ser aplicada a diferentes equipamentos. A metodologia permite o acoplamento de diferentes eventos que possam ocorrer na vida de uma estrutura. Entende-se por eventos a aparição de defeitos por diferentes vias: processos corrosivos, danos por terceiros, operações incorretas, etc., ou, eventos relacionados à inspeção da estrutura, duto ou equipamento. Cada evento é descrito por uma função de estado limite do tipo *capacidade x demanda*. O acoplamento desses estados limites é dado pela união ou interseção deles (sistemas em série, paralelo, ou combinação deles). A análise é reduzida ao cálculo da confiabilidade de um sistema, cuja solução é feita usando a função padrão multinormal e os métodos de primeira ordem *FORM*, para o cálculo da probabilidade de falha de cada estado limite, e os métodos do produto das probabilidades condicionais *PCM* e *I-PCM*, para o cálculo da probabilidade de falha do sistema através da integral multinormal. As informações obtidas dos resultados desta metodologia podem ser úteis na geração de planos de inspeção, análises preditivas e análises de risco, para contribuir na tomada de decisões sobre prazos e técnicas de inspeção a serem empregadas. A metodologia mencionada acima pode ser implementada em um programa de gerenciamento de confiabilidade estrutural, o qual deve ser capaz de acoplar todos os eventos, os dados conhecidos, as incertezas próprias dos dados e as novas informações ao longo da vida útil de uma estrutura.

## Palavras-chave

Confiabilidade Estrutural; Distribuição Multinormal; Dutos; Corrosão; Mossa; Sulco.

## Abstract

Carvajalino, José de Jesús Leal; Freire, José Luiz de França (Advisor). **Coupling Limit States to Structural Reliability Assessment of Pipelines and Structures.** Rio de Janeiro, 2010. 139 p. Doctoral Thesis - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents concepts used in the assessment of structural reliability in order to calculate the probability of failure of a structure as it serves the purposes for which it was designed during their lifetime. A methodology for structural reliability analysis has been developed for the pipeline transportation of oil and natural gas, although, this methodology can be applied to different equipment. The methodology allows the coupling of different events that may occur in the life of a structure. The events can be understood as defects by corrosion, damage by third parties, incorrect operations, etc. or events related to inspection of the structure, pipeline or equipment. Each event is described by a limit state function of the type *capacity* vs. *demand*. The coupling of these states limit is given by the union or intersection of these (series systems, parallel systems, or combination of them). The analysis is reduced to system reliability computation and the solution is reached using the integration of the standard multinormal function and first order reliability methods- *FORM* to calculate the probability of failure of system. The multinormal integral is computation using the product of conditional marginal method-*PCM* and the improvement of *PCM* method. The results obtained of this methodology may be useful in the generation of inspection plans and in predictive and risk analysis. The methodology described can be implemented in a structural reliability management program. The program should be able to coupling all events that occur in the lifetime of a pipeline or structure.

## Keywords

Structural Reliability; Multinormal Distribution; Pipelines; Corrosion; Dent; Gouge.

# Sumário

<b>1. Introdução</b>	<b>15</b>
1.1. Cálculo da probabilidade de falha	16
1.2. Avaliação da confiabilidade estrutural de dutos com defeitos de corrosão e danos tipo mocha-sulco	19
1.3. Conteúdo da tese	26
<b>2. Conceitos de confiabilidade estrutural</b>	<b>27</b>
2.1. Probabilidade de falha	28
2.2. Métodos para o cálculo da probabilidade de falha	30
2.2.1. Método de confiabilidade de primeira ordem ( <i>form</i> )	30
2.2.2. Método de confiabilidade de segunda ordem ( <i>sorm</i> )	34
2.2.3. Novo algoritmo <i>FORM</i> por low e tang ( <i>FORM-LT</i> )	34
2.2.4. Método de simulação Monte Carlo	38
2.3. Análise de confiabilidade estrutural de sistemas	39
2.4. Interseção e união de probabilidades	41
2.5. Atualização da probabilidade de falha	42
<b>3. Métodos para a solução da função multinormal</b>	<b>44</b>
3.1. A função binormal	44
3.2. A função multinormal	48
3.3. Método de primeira ordem multinormal- <i>FOMN</i>	51
3.4. Método do produto das probabilidades condicionais - <i>PCM</i>	54
3.5. Método melhorado do produto das probabilidades condicionais – <i>I-PCM</i>	57

<b>4. Dano em dutos causados por corrosão</b>	<b>61</b>
4.1. Funções de estados limites	61
4.1.1. Medição dos defeitos de corrosão	63
4.1.2. Detecção dos defeitos de corrosão	64
4.2. Falha de um duto corroído	66
4.2.1. Modelos de pressão de falha para dutos corroídos	67
4.2.2. Probabilidade de falha para dutos corroídos	69
4.3. Modelagem da corrosão	76
4.3.1. Modelagem fenomenológica da taxa de corrosão	77
4.3.2. Extrapolação da taxa de corrosão usando só a geometria do defeito	80
4.3.3. Aplicação da modelagem da taxa de corrosão na confiabilidade estrutural	82
4.4. Atualização segundo o método de inspeção usado	90
<b>5. Dano em dutos causados por interferência externa</b>	<b>95</b>
5.1. Função de estado limite mocha-sulco	95
5.2. Probabilidade de falha do dano mocha-sulco	101
5.2.1. Influência do comprimento do sulco na probabilidade de falha do dano mocha-sulco	106
5.2.2. Influência da pressão de operação na probabilidade de falha do dano mocha-sulco	113
5.2.3. Influência da profundidade da mocha na probabilidade de falha do dano mocha-sulco	115
5.2.4. Influência da profundidade do sulco na probabilidade de falha do dano mocha-sulco	116

**6. Conclusões e considerações finais** **118**

**7. Referências bibliográficas** **121**

**Apêndice A**

**Aplicação da análise de valor extremo em dutos com  
defeitos de corrosão** **131**

## Lista de figuras

Figura 2.1. Fundamento da integridade estrutural	28
Figura 2.2. Distribuição normal da função de estado limite $m$	29
Figura 2.3. Representação da superfície de falha no espaço padronizado	32
Figura 2.4. Método <i>FORM</i> algoritmo <i>HR-LF</i>	33
Figura 2.5. (a) Sistema em série. (b) Sistema em paralelo	39
Figura 3.1. Função Binormal	46
Figura 3.2. Influência do coeficiente de correlação na função de densidade de probabilidade padrão binormal	47
Figura 3.3. Cálculo da <i>POF</i> para um sistema com duas Funções limites. Usando a integral da função de densidade de probabilidade padrão binormal	50
Figura 3.4. Cálculo da <i>POF</i> para um sistema em série Bidimensional (a) Região de falha verdadeira eq. (3.41) (b) Espelho da região de falha usado pelo <i>PCM</i> eq. (3.40)	58
Figura 4.1. Distribuição das medições de um <i>PIG</i> com Exatidão de $\pm 10\%$ de $t$ , com nível de confiança de 80 %	63
Figura 4.2. Curva de <i>POD</i> para um <i>PIG</i> Magnético ( <i>MFL</i> )	65
Figura 4.3. Curva de <i>POD</i> para técnica de inspeção por partículas magnéticas ( <i>MPI</i> ) em baixo d'água	65
Figura 4.4. Estados limites para dutos com defeitos de corrosão	67
Figura 4.5. Geometria de um defeito de corrosão	67
Figura 4.6. Planilha <i>EXCEL</i> para o cálculo da probabilidade de falha	74
Figura 4.7. Fator de importância de cada variável na <i>POF</i> por ruptura	75
Figura 4.8. Fator de importância de cada variável na <i>POF</i> por vazamento	75

Figura 4.9. Modelos mais comuns que descrevem a perda por corrosão	77
Figura 4.10. Modelo de perda por corrosão	82
Figura 4.11. Cálculo da <i>POF</i> seguindo um modelo de corrosão com atualização (inspeção) e sem atualização	87
Figura 4.12. Influência do modelo de corrosão no cálculo da <i>POF</i>	89
Figura 4.13. Crescimento da trinca na chapa	91
Figura 4.12. Atualização da <i>POF</i>	93
Figura 5.1. Dano mecânico Mossa-Sulco	96
Figura 5.2. Diagrama de Falha ( <i>FAD – Failure Assessment Diagram</i> )	97
Figura 5.3. Planilha <i>EXCEL</i> para o cálculo da <i>POF</i> devido ao dano moossa-sulco	102
Figura 5.4. Diagrama de falha para o dano moossa-sulco com o ponto mais provável de falha	103
Figura 5.5. Fator de importância de cada variável na <i>POF</i> por ruptura	103
Figura 5.6. Freqüência de falha em função do diâmetro do duto	105
Figura 5.7. Influência de $L_s$ na <i>POF</i> do dano moossa-sulco	106
Figura 5.8. Influência de $L_s$ na avaliação do dano moossa-sulco usando o <i>FAD</i>	107
Figura 5.9. Região de vazamento e de ruptura no <i>FAD</i>	109
Figura 5.10. Planilha <i>EXCEL</i> para o cálculo da probabilidade de $L_c - L_s \leq 0$ e $L_c - L_s > 0$	111
Figura 5.11. Fator de importância de cada variável na <i>POF</i> por ruptura	111
Figura 5.12. Influência da pressão de operação da <i>POF</i> de um duto com defeito moossa-sulco	113
Figura 5.13. Influência da pressão de operação no <i>FAD</i> de um duto com defeito moossa-sulco	114
Figura 5.14. Influência da profundidade da moossa na <i>POF</i>	

de um duto com defeito mocha-sulco	115
Figura 5.15. Influência da profundidade da mocha no <i>FAD</i>	
de um duto com defeito mocha-sulco	116
Figura 5.16. Influência da profundidade do sulco na <i>POF</i>	
de um duto com defeito mocha-sulco	117
Figura 5.17. Influência da profundidade da mocha no <i>FAD</i>	
de um duto com defeito mocha-sulco	117
Figura 6.1. Programa para o gerenciamento da confiabilidade	
estrutural de dutos corroídos	119

## Lista de tabelas

Tabela 4.1 Variáveis do duto AA API 5L X52	73
Tabela 4.2 Dados do defeito	73
Tabela 4.3 Dados da inspeção ( <i>PIG MFL</i> 80% de confiança)	73
Tabela 4.4 Resultados das análises de <i>POF</i>	74
Tabela 4.5 Resultados das análises de <i>POF</i> com vários defeitos	76
Tabela 4.6 Resultados das análises de <i>POF</i>	83
Tabela 4.7 – <i>POF</i> admissível ULS segundo a DNV RP F-101	84
Tabela 4.8 - $POF(g_I \geq 0)$ para o ano 14	85
Tabela 4.9 – Variáveis	88
Tabela 4.10 Resultados das análises de <i>POF</i>	88
Tabela 4.11 - $POF(g_I \geq 0)$ para o ano 7	89
Tabela 5.1 Variáveis usadas no cálculo da <i>POF</i>	102
Tabela 5.2 Frequência de Falha usando confiabilidade estrutural	104
Tabela 5.3 Frequência de Falha de bases de dados	105
Tabela 5.4 Cálculo da probabilidade de $L_c - L_s \leq 0$ e $L_c - L_s > 0$	112
Tabela 5.5 Cálculo da <i>POF</i> por ruptura e vazamento	112
Tabela 5.6 Cálculo da <i>POF</i> total	112