



Alberto Edwin Ildelfonso Alvino

**Aplicação da Lógica Nebulosa ao Modelo Muhlbauer
Para Análise de Risco em Dutos**

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
Dezembro de 2003



Alberto Edwin Ildefonso Alvino

**Aplicação da Lógica Nebulosa ao Modelo
Muhlbauer para Análise de Risco em Dutos**

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. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Luiz de França Freire

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Tito Luiz da Silveira

Escola de Engenharia – UFRJ

Prof. Nelson Francisco Favilla Ebecken

COPPE / UFRJ

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de Dezembro de 2003

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

Alberto Edwin Ildefonso Alvino

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Nacional de Engenharia em 1994. Kursou o Mestrado em Engenharia Mecânica em 2000 na PUC-Rio

Ficha Catalográfica

Alvino, Alberto Edwin Ildefonso

Aplicação da lógica nebulosa ao modelo Muhlbauer para análise de risco em dutos / Alberto Edwin Ildefonso Alvino; orientador: José Luiz de França Freire. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2003.

223 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Análise de risco. 3. Modelo Muhlbauer. 4. Lógica nebulosa. 5. Dutos. I. Freire, José Luiz de França. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao professor José Luiz de França Freire, pela orientação durante o desenvolvimento do curso de Doutorado.

A CNPQ, pelo suporte financeiro.

Aos professores da PUC – RIO pelo ensino e ajuda, que me serviram, para poder culminar o presente trabalho.

A todos os colegas da pós-graduação, pelos momentos de amizade.

A todos os funcionários do departamento de Engenharia Mecânica, pela ajuda brindada durante este tempo.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, e seus funcionários em geral, que sempre foram fontes de alegria.

Às pessoas, amigos e amigas, em especial a VOCÊ.

Resumo

Ildefonso, Alvino; Freire, José Luiz de França. Aplicação da Lógica Nebulosa ao Modelo Muhlbauer Para Análise de Risco em Dutos. Rio de Janeiro, 2003. 223p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

W. Kent Muhlbauer fez uma identificação detalhada de aproximadamente 300 diferentes condições que influenciam a avaliação do Risco em uma tubulação e propôs um sistema de pontuação que é conhecido mundialmente como o método de Muhlbauer.

O método de Muhlbauer avalia as diversas variáveis que influenciam no Risco de dutovias mediante a atribuição de valores quantitativos. No entanto, sendo um método qualitativo, estas variáveis não podem ser informadas através de valores exatos. Estas variáveis podem ser tratadas como provenientes de distribuições randômicas. Entretanto, identificar as distribuições randômicas pode exigir muito esforço. Sendo assim, em vez de assumir que as avaliações das variáveis têm distribuições randômicas, pode-se considerar que têm distribuições dadas por conjuntos e números nebulosos.

No presente trabalho, os valores numéricos presentes no modelo Muhlbauer passaram a ser admitidos como não determinísticos, admitindo uma incerteza. Esta incerteza depende do engenheiro especialista avaliador do Risco. Para incorporar esta incerteza no cálculo do valor do Risco procurou-se trabalhar com os conjuntos e números nebulosos.

Na análise das incertezas mediante os conjuntos nebulosos, requer-se definir as variáveis lingüísticas (**VL**), os valores lingüísticos das **VL** de saída e entrada, as funções de pertinência, além das regras nebulosas. Com estes, um Sistema de Lógica Fuzzy (SLF) é implementado com base na inferência Mamdani. No caso dos números nebulosos, estes admitem um valor mais provável e uma incerteza. Esta incerteza é avaliada por uma função de pertinência normalizada. Operações de soma, subtração, multiplicação e divisão são possíveis para os números fuzzy. Como resultado final torna-se possível encontrar-se não só um número que define o Risco como também a incerteza (faixa de valores) que este Risco pode ter, que é uma função das incertezas das avaliações individuais das variáveis.

O presente trabalho propõe um modelo básico de Gerenciamento de Risco (**GR**) e Análise de Integridade Estrutural (**AIE**) para dutos com corrosão externa. Para isso, os resultados de uma **AIE** nível I aplicado aos dutos é relacionada com a metodologia de análise de Risco de W. Kent Muhlbauer, através de uma Matriz de Risco.

A partir de uma **AIE** nível I o cálculo da Vida Residual (**T***) é avaliada. A **T*** é comparada com uma Vida Desejada (**VD**), a qual é obtida da matriz de risco. Se **T*** é menor que a **VD**, recomenda-se fazer uma **AIE** nível II. Se **T*** é maior que **VD** determina-se um Tempo de Inspeção (**TI**) baseado na análise de confiabilidade.

Palavras-chave

Lógica Nebulosa, Análise de Risco, Modelo Muhlbauer, Dutos.

Abstract

Ildefonso, Alvino; Freire, José Luiz de França. Application of Fuzzy Logic to the Muhlbauer Model for Pipeline Risk Analysis. Rio de Janeiro, 2003. 223p. DSc. Thesis Department of Mechanical Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

W. Kent Muhlbauer made a detailed identification of approximately 300 different conditions that influence in the evaluation of the Risk in a pipeline, so, He proposed a punctuation system that is known as the method of Muhlbauer.

Muhlbauer's method evaluates the several variables that influence in the pipeline Risk by the attribution of quantitative values. However, being a qualitative method, these variables cannot be informed through exact values. These variables can be treated as coming of distributions random. However, to identify the distributions random can demand a lot of effort. Being like this, instead of assuming that the evaluations of the variables have distributions random, it can be considered that they have distributions given by fuzzy sets and numbers.

In the present work, the values numeric presents in the model Muhlbauer will be admitted as no deterministic, admitting an uncertainty. This uncertainty depends on the engineer specialist knowledge about the Risk. To incorporate this uncertainty in the calculation of the value of the Risk Muhlbauer tried to work with the fuzzy sets and numbers.

In the analysis of the uncertainties by the fuzzy sets, it is necessary to define the linguistic variables (VL), the linguistic values of input and output of VL, the membership functions, besides the fuzzy rules. With these, a System of Logic Fuzzy (SLF) is implemented based on Mamdani's inference. In the case of the fuzzy numbers, they admit a more probable value and an uncertainty. This uncertainty is evaluated by a function of normalized membership. Sum, subtraction, multiplication and division operations are possible for the numbers fuzzy. As result, it is possible to find not only a number that defines the Risk as also the uncertainty (range of values) that the Risk can have. It is a function of the uncertainties of the individual evaluations of the variables.

The present work proposes a basic model of Management of Risk (GR) and Analysis of Structural Integrity (AIE) for pipeline with damage corrosion. For that, the results of an AIE

level one applied to the pipeline are associated with the results of Muhlbauer's method through a Risk Matrix.

Starting from an AIE level one, the calculation of the Residual Life (T^*) is evaluated. T^* is compared with a ideal life (VD), which is obtained of the Risk Matrix. If T^* is smaller than VD, it is recommended to do an AIE level II. If T^* is larger than VD is determined a Time of Inspection based on the reliability analysis.

Keywords

Fuzzy Logic, Risk Analisys, Muhlbauer's Model, Pipeline.

Sumário

CAPITULO 1

| | |
|---|----------|
| INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1.- SISTEMAS DE TUBULAÇÃO DE TRANSMISSÃO | 1 |
| 1.2.- DEFINIÇÃO DE RISCO EM SISTEMAS DE TUBULAÇÃO DE TRANSMISSÃO | 2 |
| 1.3.- AVALIAÇÃO QUANTITATIVA E QUALITATIVA DO RISCO | 2 |
| 1.4.- TEORIA DE LÓGICA FUZZY NA AVALIAÇÃO DE RISCO QUALITATIVO | 3 |
| 1.5.- NECESSIDADE DA COMPREENSÃO INTEGRAL DO PROBLEMA DE AVALIAÇÃO DO RISCO EM SISTEMAS DE TUBULAÇÃO QUE TRANSPORTAM PETRÓLEO, GÁS OU DERIVADOS | 4 |
| 1.6.- IMPORTANCIA DA AVALIAÇÃO DO RISCO NA ATIVIDADE DUTOVIARIA | 5 |
| 1.7.- ESTADO DA ARTE | 6 |
| 1.8.- APRESENTAÇÃO DA TESE | 12 |

CAPITULO 2

| | |
|---|-----------|
| AVALIAÇÃO DO RISCO NO SISTEMA DE TUBULAÇÃO PARA TRANSMISSÃO DE PETRÓLEO E/OU GÁS MEDIANTE O MODELO MUHLBAUER | 14 |
| 2.1.- MODELO DE MUHLBAUER | 18 |
| 2.2.- CONTROLE DO RISCO ATRAVÉS DO MODELO DO MUHLBAUER | 26 |
| 2.3.- UMA PLANILHA PARA O MODELO MUHLBAUER | 33 |
| 2.4.- ANÁLISE DE CUSTO ATRAVÉS DA METODOLOGIA MUHLBAUER | 39 |
| 2.5.- ANÁLISE DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL EM DUTOS | 48 |
| 2.6.- GERENCIAMENTO DOS RESULTADOS DE RISCO E AIE NOS DUTOS | 50 |
| 2.6.1.- CÁLCULO DA VIDA RESIDUAL (T*) DE UM DUTO CORROSIDO LONGITUDINALMENTE | 53 |
| 2.6.2.- AIE E SEU ACOPLAMENTO COM A MATRIZ DE RISCO | 57 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 2.6.3.- CÁLCULO DO TEMPO DE INSPEÇÃO | 59 |
|--------------------------------------|----|

CAPITULO 3

| | |
|---|-----------|
| LÓGICA FUZZY NA ANÁLISE DE RISCO | 62 |
|---|-----------|

| | |
|--|-----|
| 3.1.- DEFINIÇÕES BÁSICAS | 65 |
| 3.1.1 .- VALORES LINGÜÍSTICOS | 66 |
| 3.1.2.- CONJUNTO FUZZY | 66 |
| 3.1.3.- FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA | 66 |
| 3.1.4.- CORTE α (α -CUT) | 68 |
| 3.1.5.- PRINCÍPIO DE EXTENSÃO | 68 |
| 3.1.6.- VARIÁVEL LINGÜÍSTICA (VL) | 69 |
| 3.1.7.- RELAÇÕES FUZZY | 70 |
| 3.1.8.- COMPOSIÇÃO MAX-MIN | 72 |
| 3.1.9.- OPERAÇÕES COM CONJUNTOS FUZZY | 73 |
| 3.1.10.- BASE DE REGRAS FUZZY | 74 |
| 3.1.8.- IMPLICAÇÃO | 75 |
| 3.2.- METODOLOGIAS PARA AVALIAR O RISCO BASEADA NA LÓGICA FUZZY | 76 |
| 3.3.- INFERÊNCIA MAMDANI | 81 |
| 3.3.1.- SISTEMAS DE LÓGICA FUZZY | 86 |
| 3.3.2.- IDENTIFICAÇÃO DE UM SISTEMA FUZZY | 87 |
| 3.3.2.1.- BASE DE REGRAS | 90 |
| 3.3.2.1.1.- MÉTODO DE GERAÇÃO DE REGRAS BASEADA NO PRINCÍPIO DE EXTENSÃO | 91 |
| 3.3.2.1.2.- MÉTODO DE GERAÇÃO DE REGRAS BASEADA NOS VALORES MÁXIMOS DOS CONJUNTOS FUZZY | 93 |
| 3.3.2.1.3.- MÉTODO DE GERAÇÃO DE REGRAS BASEADO NO MÉTODO DE ISHIBUCHI | 95 |
| 3.3.2.2.- TIPOS DE AGREGAÇÃO E DESFUZIFICAÇÃO | 99 |
| 3.3.2.3.- QUANTIDADE DE CONJUNTOS FUZZY | 101 |
| 3.4.- NÚMERO FUZZY | 108 |
| 3.4.1.- DEFINIÇÃO NÚMEROS FUZZY | 108 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 3.4.1.1.- OPERAÇÕES COM NÚMEROS FUZZY | 110 |
|---------------------------------------|-----|

CAPITULO 4

| | |
|--|------------|
| FUZIFICAÇÃO DO MODELO MUHLBAUER | 113 |
|--|------------|

| | |
|--|-----|
| 4.1.- PROBLEMAS A SUPERAR NA FUZIFICAÇÃO DO MODELO MUHLBAUER | 115 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| 4.1.1.- A SENSIBILIDADE DO MODELO MUHLBAUER | 115 |
|---|-----|

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 4.1.2.- PROBLEMA DE DISCRETIZAÇÃO | 118 |
|-----------------------------------|-----|

| | |
|--|-----|
| 4.1.2.1.- INFLUENCIA DO TIPO DE AGREGAÇÃO E DESFUZIFICAÇÃO | 119 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| 4.1.2.2.- INFLUENCIA DO NÚMERO DE CONJUNTOS FUZZY | 121 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| 4.2.- MODELOS PROPOSTOS PARA FUZIFICAR O MODELO MUHLBAUER | 122 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| 4.2.1.- PRIMEIRO MODELO – SLF GENÉRICO | 122 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| 4.2.1.1.- RESULTADOS DO PRIMEIRO MODELO | 131 |
|---|-----|

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 4.2.2.- SEGUNDO MODELO – SLF PRECISO | 133 |
|--------------------------------------|-----|

| | |
|--|-----|
| 4.2.2.1.- RESULTADOS DO SEGUNDO MODELO | 135 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| 4.2.3.- TERCEIRO MODELO - APLICAÇÃO DE NÚMEROS FUZZY NA AVALIAÇÃO DO RISCO MEDIANTE O MODELO DE MUHLBAUER | 137 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| 4.3.- DISCUSSÃO DOS TRÊS MODELOS PROPOSTOS | 140 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| 4.3.- INTERFACE GRÁFICA PARA O INGRESSO DE INFORMAÇÕES NOS TRES MODELOS PROPOSTOS | 143 |
|---|-----|

CAPÍTULO 5

| | |
|-------------------------|------------|
| ESTUDOS DE CASOS | 145 |
|-------------------------|------------|

| | |
|------------------------------------|-----|
| 5.1.- ANALISE DE RISCO DO DUTO A-G | 145 |
|------------------------------------|-----|

| | |
|--|-----|
| 5.1.1.- ANALISE DE BENEFICIO/CUSTO NO DUTO A-G | 160 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| 5.1.2.- CÁLCULO DO TEMPO DE INSPEÇÃO DEVIDO AO DANO POR CORROSÃO ATMOSFÉRICA | 162 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| 5.2.- ANALISE DE RISCO DO DUTO B-A, C-A e X-B | 168 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| 5.2.1.- CÁLCULO DO TEMPO DE INSPEÇÃO DEVIDO AO DANO POR CORROSÃO ATMOSFÉRICA NOS DUTOS B-A, C-A E X-B | 169 |
|---|-----|

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 6 | |
| COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 172 |
| BIBLIOGRAFIA | 178 |
| ANEXO | 185 |

LISTA DE FIGURA

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Fluxograma geral da pesquisa a realizar | 13 |
| Figura 2.1: Mapeamento dos resultados do Modelo de Muhlbauer | 27 |
| Figura 2.2: Matriz de Risco proposto pela API para equipamentos em plantas eletroquímicas | 28 |
| Figura 2.3: matriz de Risco proposto pela API para sistemas de tubulações | 29 |
| Figura 2.4: Matriz de Risco proposto nesta trabalho baseado nos resultados do modelo Muhlbauer | 29 |
| Figura 2.5: Níveis de Risco – primeira proposta. | 30 |
| Figura 2.6: Localização das avaliações A,A1 e A2 na matriz de Risco | 31 |
| Figura 2.7: Matriz de Risco –segundo proposta | 32 |
| Figura 2.8: Fluxograma proposto para a planilha de base de dados | 34 |
| Figura 2.9: Resumo das Avaliações de todos os trechos de dutovias. | 35 |
| Figura 2.10: Formas de priorização de trechos | 35 |
| Figura 2.11: Dados necessários para avaliar o risco segundo a metodologia de Muhlbauer | 36 |
| Figura 2.12: Continuação da figura 2.11. | 37 |
| Figura 2.13: Nível de Risco de um trecho de dutovia | 38 |
| Figura 2.14: Nível dos índices de prevenção para um trecho de dutovia | 39 |
| Tabela 2.5: Custos e pontuações das alternativas das variáveis preventivas do Índice de dano por corrosão de duto enterrado | 41 |
| Figura 2.5: Janela inicial do aplicativo “Análise de Risco” | 42 |
| Figura 2.6: Opções implementadas no aplicativo “Análise de Risco” | 43 |
| Figura 2.7: Janela de identificação do duto no aplicativo “Análise de Risco” | 43 |
| Figura 2.8: Janela de entrada de dados para as variáveis do tipo atributos no aplicativo “Análise de Risco” | 44 |
| Figura 2.9: Janela de entrada de dados para as variáveis do tipo prevenção no aplicativo “Análise de Risco” | 45 |
| Figura 2.10: Janela de entrada de dados para as variáveis do FIV no aplicativo “Análise de Risco” | 45 |
| Figura 2.11: Janela de resultados obtido do aplicativo “Análise de Risco” | 46 |
| Figura 2.12: Janela de ajuda do aplicativo “Análise de Risco” | 47 |
| Figura 2.13: Estatística de acidentes nos Estados Unidos, Europa e Canadá | 48 |

| | |
|---|-----|
| Figura 2.14: Representação de um duto corroído com defeito longitudinal. | 54 |
| Figura 2.15: Matriz de Risco devido ao dano de corrosão no duto enterrado | 57 |
| Figura 2.16: Interface gráfica para a determinação do tempo de inspeção | 60 |
| Figura 3.1: Representação gráfica de um conjunto fuzzy M | 67 |
| Figura 3.2: Representação gráfica de α -cut=0.5 no conjunto fuzzy M | 68 |
| Figura 3.3: Imagem do conjunto fuzzy M ao conjunto fuzzy P através da função $y=x^2$ | 69 |
| Figura 3.4: Variável lingüística X com quatro conjuntos fuzzy | 70 |
| Figura 3.5: Conjuntos fuzzy A e B | 73 |
| Figura 3.6: União dos conjuntos fuzzy A e B | 74 |
| Figura 3.7: Interseção dos conjuntos fuzzy A e B | 74 |
| Figura 3.8: Procedimento geral da inferência Mamdani para obter a saída C' com base nos valores de entrada x1 e x2. | 77 |
| Figura 3.9: Procedimento geral da inferência monotônica para obter o resultado em base a uma variável de entrada x | 77 |
| Figura 3.10: Procedimento geral da inferência monotônica para obter o resultados para três variáveis de x1,x2 e x3 | 78 |
| Figura 3.11: Inferência Mamdani com método de agregação MÁXIMO | 83 |
| Figura 3.12: Inferência Mamdani com método de agregação SOMA | 84 |
| Figura 3.13: Valores zs, zm, zl, zb e zc obtidos segundo diferentes métodos de desfuzificação. | 85 |
| Figura 3.14: Estrutura de um sistema de lógica fuzzy | 86 |
| Figura 3.15: Entrada de dados no aplicado. | 88 |
| Figura 3.16: Obtenção de resultados do aplicativo | 89 |
| Figura 3.17: Entrada de dados em forma CRISP ou por números fuzzy no aplicativo | 90 |
| Figura 3.18: Resultado obtido pelo aplicativo 1 | 92 |
| Figura 3.19: Conjuntos fuzzy gerados pelo aplicativo para a variável lingüística X | 93 |
| Figura 3.20: Resultado obtido pelo aplicativo 2 | 95 |
| Figura 3.21: Resultado obtido pelo aplicativo 3 | 97 |
| Figura 3.22: Resultado obtido pelo aplicativo 4 | 98 |
| Fig. 3.23: Erro quadrático e erro quadrático médio para as dez opções da tabela 3.3. | 100 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.24: Máxima variação gerada pelas dez opções da tabela 3.3 | 100 |
| Figura 3.25: Erros quadráticos gerado pelos SLF para diferentes quantidades de conjuntos fuzzy | 102 |
| Figura 3.26: Variação máxima gerada pelos SLF para diferentes quantidades de conjuntos fuzzy | 103 |
| Figura 3.27: Resultados dos SLF quando as variáveis de entradas são expressas mediante conjuntos CRIPS | 105 |
| Figura 3.28: Resultados dos SLF quando as variáveis de entradas são expressas mediante conjuntos fuzzy | 105 |
| Figura 3.29: Resultado gerado pelo aplicativo para o SLF escolhido | 107 |
| Figura 3.30: Representação gráfica de um número fuzzy | 109 |
| Figura 3.31: Operações com números fuzzy | 111 |
| Figura 3.32: Números fuzzy tipo trapezoidal | 111 |
| Figura 4.1: Mapeamento dos resultados do modelo Muhlabuer | 115 |
| Figura 4.2: Mapeamento dos resultados do Modelo Muhlbauer quando o FIV é substituído por FIV^{-1} | 116 |
| Figura 4.3: SLF que aproxima à função multiplicação | 117 |
| Figura 4.4: SLF que aproxima a divisão | 118 |
| Fig.4.5: Seleção do tipo de desfuzificação e agregação em função dos resultados do erro quadrático | 119 |
| Figura 4.6: Seleção do tipo de desfuzificação e agregação em função dos resultado da variação máxima | 120 |
| Figura 4.7: Seleção do SLF em função da quantidade de conjuntos fuzzy das variáveis lingüísticas de entrada e do resultado da variação máxima | 121 |
| Figura 4.8: Generalização do aplicativo explicado em 3.3.2. | 124 |
| Figura 4.9: SLF gerado pelo aplicativo modificado | 125 |
| Figura 4.10: Agrupamento das variáveis do índice de dano por corrosão | 127 |
| Figura 4.11: Primeiro modelo proposto para avaliar o Risco por corrosão | 128 |
| Figura 4.12: Resultado do erro quadrático para o primeiro modelo | 131 |
| Figura 4.13: Resultado da variação máxima para o primeiro modelo | 131 |
| Figura 4.14: Segundo modelo proposto para avaliar o Risco de dano por corrosão | 134 |
| Figura 4.15: Resultado do erro quadrático para o Modelo 2 | 136 |
| Figura 4.16: Resultado da variação máxima para o Modelo 2 | 136 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.17: Esquema geral do modelo Muhlbauer | 138 |
| Figura 4.18: Interface gráfica para avaliar o Risco quando as variáveis do índice de dano por corrosão são expressas mediante números fuzzy | 139 |
| Figura 4.19: Visualização da interface utilizada para o ingresso de Informação necessária para avaliar o Risco por corrosão segundo o primeiro, segundo e terceiro modelo proposto | 144 |
| Figura 5.1: Informações do trecho A-G | 146 |
| Figura 5.2: Informações do trecho A-G (continuação) | 147 |
| Figura 5.3: Influência do Risco por danos de terceiros, corrosão, projeto e operações incorretas no Risco total. | 150 |
| Figura 5.4: Resultado da pontuação de prevenção nos quatro índices | 150 |
| Figura 5.5: Comparação entre os resultados do Risco obtido por Pezzi e o modelo Muhlbauer para o duto A-G | 152 |
| Figura 5.6: Resultados de Risco obtidos quando se introduz incerteza em 3 variáveis do índice de dano por corrosão e 2 variáveis do FIV | 157 |
| Figura 5.7: Níveis de Risco do duto A-G com base nos resultados dos três modelos explicados nos capítulo quatro | 159 |
| Figura 5.8: Comparação entre os resultados do nível de Risco obtido por Pezz, modelo Muhlbaer e os três modelos mencionados no capítulo quatro | 159 |
| Figura 5.9: Pontuações e custos das oito variáveis do índice de dano por Corrosão de duto enterrado | 161 |
| Figura 5.10: Resultados da análise Benefício/Custo para o Duto A-G | 161 |
| Figura 5.11: Resultado do tempo de inspeção para o duto A-G | 163 |
| Figura 5.12: Matriz de Risco para o dano por corrosão no duto enterrado | 164 |
| Figura 5.13: Variação da pressão admissível e de operação em função do tempo | 165 |
| Figura 5.14: Variação da incerteza de Pa-Pa em função do tempo | 166 |
| Figura 5.15: Função de densidade das variáveis aleatorias Pa e Po. | 166 |
| Figura 5.16: Variação da vida residual em função da pressão de operação | 167 |
| Figura 5.17: Função de densidade acumulada e função de densidade da variável aleatória vida residual. | 167 |
| Figura 5.18: Função densidade para as variáveis aleatórias vida residual e vida desejada. | 167 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1: Variáveis do índice de corrosão | 22 |
| Tabela 2.2: Alternativas e suas pontuações para a variável tipo de atmosfera. | 22 |
| Tabela 2.3: Variáveis do fator impacto de Vazamento | 23 |
| Tabela 2.4: Número de itens preventivos para cada índice de dano. | 26 |
| Tabela 2.5: Custos e pontuações das alternativas das variáveis preventivas do Índice de dano por corrosão de duto enterrado | 41 |
| Tabela 2.6: Vida desejada, incerteza desejada e probabilidade de falha Desejada segundo os níveis de Risco | 58 |
| Tabela 3.1: Valores lingüísticos para L , C e E dados por Karwoski e Mital | 80 |
| Tabela 3.2: Resumo de resultados das figuras 3.18, 3.20, 3.21 e 3.22 | 98 |
| Tabela 3.3: Diferentes opções de seleção para o tipo de agregação e desfuzificação | 99 |
| Tabela 3.4: SLF escolhidos dos 640 fuzzy analisados. | 106 |
| Tabela 4.1: SLF do primeiro modelo proposto para avaliar o Risco. | 129 |
| Tabela 4.2: SLF do primeiro modelo proposto para avaliar o Risco (continuação da tabela 4.1) | 130 |
| Tabela 4.3: Resultado de seleção dos tipos de agregação e de Desfuzificação para os SLF da figura 4.9. | 132 |
| Tabela 4.4: Resultados da seleção dos tipos de agregação e de Desfuzificação dos SLF da figura 4.12 | 135 |
| Tabela 5.1: Informações principais dos dutos A-G, B-A, C-A, e X-B | 145 |
| Tabela 5.2: Resultados do Risco para o trecho A-G (1) | 149 |
| Tabela 5.3: Resultado do Risco total no duto A-G (2) | 158 |
| Tabela 5.4: Resultados de Risco para os quatro trechos | 168 |
| Tabela 5.5: Cálculo do intervalo de valores para o Risco nos quatro trechos | 168 |
| Tabela 5.6: Cálculo da relação entre o Risco avaliado para cada trecho e o Risco mínimo possível. | 169 |
| Tabela 5.7: Resultados do tempo de inspeção para os trechos B-A, C-A e X-B | 170 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------------|--|
| SLF | : sistema de lógica fuzzy |
| SLFs | : sistemas de lógica fuzzy |
| FIV | : fator impacto de vazamento |
| FIV⁻¹ | : inversa do fator impacto de vazamento |
| MAOP | : máxima pressão admissível de operação |
| RBI | : inspeção baseado em Risco |
| R_d | : taxa de corrosão radial (mm/ano) |
| R_L | : taxa de corrosão longitudinal (mm/ano) |
| d | : perda de espessura por corrosão (mm) |
| σ_d* | : desvio padrão de d (mm) |
| do | : perda de espessura inicial (mm) |
| σ_{do}* | : desvio padrão de do (mm) |
| L | : longitude do defeito por corrosão (mm) |
| σ_L* | : desvio padrão de L (mm) |
| Lo | : longitude do defeito inicial por corrosão (mm) |
| σ_{Lo}* | : desvio padrão de Lo (mm) |
| T | : tempo (anos) |
| σ_T | : desvio padrão de T (anos) |
| To | : tempo inicial (anos) |
| σ_{To} | : desvio padrão de To (anos) |
| T* | : vida residual (anos) |
| σ_{T*} | : desvio padrão de T* (anos) |
| CS | : coeficiente de segurança |
| Pa | : pressão admissível (MPa) |
| σ_{Pa} | : desvio padrão de Pa (MPa) |
| Po | : pressão de operação (MPa) |
| σ_{Po} | : desvio padrão de Po (MPa) |
| Sp | : tensão de ruptura que levaria o duto a falhar (MPa). |
| σ_{Sp} | : desvio padrão de Sp (MPa) |
| Sy | : limite de escoamento do duto (MPa) |
| σ_{Sy} | : desvio padrão de Sy (MPa) |

| | |
|--------------------------------|---|
| A | : área do defeito do duto (mm^2) |
| Ao | : área do defeito inicial do duto (mm^2) |
| t | : espessura do duto (mm) |
| σ_t | : desvio padrão de t (mm) |
| M | : fator de Folias |
| σ_M | : desvio padrão de M |
| VD | : vida desejada (anos) |
| σ_{VD} | : desvio padrão de VD (anos) |
| CV | : coeficiente de variação |
| \overline{VD} | : variável aleatória tipo normal de VD |
| $\overline{T^*}$ | : variável aleatória tipo normal de T* |
| Pfc | : probabilidade de falha calculada |
| Pfd | : probabilidade de falha desejada |
| TI | : tempo de inspeção (anos) |
| \overline{Po} | : variável aleatória tipo normal de Po |
| \overline{Pa} | : variável aleatória tipo normal de Pa |
| X | : variável idade para o problema enunciado em 3.1 |
| x | : um elemento de X |
| U | : universo de discurso de x |
| Y | : variável meio agressor para o problema enunciado em 3.1 |
| Z | : variável perda por corrosão para o problema enunciado em 3.1 |
| $\mu_M(x)$ | : função de pertinência do elemento x no conjunto fuzzy M |
| α-cut | : corte alpha |
| VL | : variável lingüística |
| MIMO | : SLF com muitas entradas e muitas saídas |
| MISO | : SLF com muitas entrada e uma só saída |
| MOM | : método de desfuzificação pela meia dos máximos |
| LOM | : método de desfuzificação pela máximo dos máximos |
| SOM | : método de desfuzificação pela mínimo dos máximos |
| a | : valor meio de um numero fuzzy |
| α | : dispersão esquerda do numero fuzzy |
| β | : dispersão direita do numero fuzzy |

| | |
|-------------|--|
| \tilde{b} | : numero fuzzy |
| CTE | : corrosão de tubulação enterrada |
| H | : relação entre a pressão de teste hidrostático com a MAOP |
| AC | : corrente alterna |
| CA | : corrosão atmosférica |
| ECM | : efeito da corrosão mecânica |
| NFPA | : Associação Americana de proteção do Fogo |
| IAP | : integrity assessment profiles |
| UM | : unidade monetária |
| Pcf | : Função densidade acumulada de probabilidade |
| Pdf | : Função densidade de probabilidade |
| AIE | : Análise de Integridade Estrutural |