



Marcos Souza Mendes de Queiroz

Modelagem numérica de reforço de dutos com emprego de materiais compósitos

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de concentração: Estruturas.

Orientadora: Prof^a. Deane de Mesquita Roehl

Rio de Janeiro, julho de 2006



Marcos Souza Mendes de Queiroz

**Modelagem numérica de reforço de dutos
com emprego de materiais compósitos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Deane de Mesquita Roehl

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Departamento de Engenharia Civil – UERJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de julho de 2006

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

Marcos Souza Mendes de Queiroz

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2001. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil (Estruturas) no ano de 2004. Desenvolveu pesquisa sobre reforço de dutos com uso de materiais compósitos. Bolsista de Iniciação Científica – CNPq, no período de setembro de 1999 a dezembro de 2000.

Ficha Catalográfica

Queiroz, Marcos Souza Mendes de

Modelagem numérica de reforço de dutos com emprego de materiais compósitos / Marcos Souza Mendes de Queiroz ; orientadora: Deane de Mesquita Roehl. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

114 f. : il.(col.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Modelagem numérica. 3. Materiais compósitos com graduação funcional. 4. Regra das misturas. 5. Reparo e reforço de dutos. 6. Elementos finitos. I. Roehl, Deane de Mesquita. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Ronaldo e Ilda, e aos
meus irmãos, Renato e Mônica, por me
terem feito sempre acreditar que os
sonhos pudessem, um dia, se tornar
realidade.

Agradecimentos

A Deus, por ter caminhado ao meu lado nos momentos alegres e me carregado em seus braços nos instantes mais difíceis da minha vida.

À professora Deane Roehl, por toda orientação e incentivo no desenvolvimento desta pesquisa;

Aos meus colegas, companheiros inseparáveis de uma longa jornada;

À minha amada Vanessa, por todo o amor, apoio, carinho e compreensão dedicados a mim;

Aos professores da área de estruturas do curso de pós-graduação do departamento de engenharia civil da PUC-Rio, por terem contribuído para que eu melhor refletisse e compreendesse as lições de sala e da vida;

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), por ter dado a oportunidade de realização deste trabalho;

Aos funcionários do departamento de engenharia civil, por todo o auxílio dispensado neste período;

A CAPES, pelo apoio financeiro prestado durante o curso de mestrado.

Resumo

Queiroz, Marcos Souza Mendes; Roehl, Deane de Mesquita. **Modelagem numérica de reforço de dutos com emprego de materiais compósitos**. Rio de Janeiro, 2006, 114p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho trata do desenvolvimento de uma modelagem numérica para estruturas cilíndricas com materiais compósitos. Uma classe especial de materiais compósitos, os materiais com gradação funcional (*FGM*), também é investigada. O modelo constitutivo adotado para o material compósito é baseado na regra das misturas. Esta metodologia é aplicada na análise de reparo e reforço de dutos, considerando as solicitações usuais de campo, notadamente as decorrentes da variação de temperatura e das pressões internas, bem como os efeitos da interação solo-estrutura. O sistema duto-reforço é modelado como elemento de viga conforme o método dos elementos finitos, e as tensões na seção são integradas numericamente. Para tanto, o material, tanto do duto quanto da camada de reforço, é admitido com comportamento elastoplástico. Alguns exemplos, simulando as condições típicas, são apresentados e discutidos, de maneira a avaliar o comportamento dos dutos recuperados com materiais compósitos, e a propor a solução mais eficiente no dimensionamento da camada de reforço, inclusive em termos do material com gradação funcional.

Palavras-chave

Modelagem numérica; materiais compósitos com gradação funcional; regra das misturas; reparo e reforço de dutos; elementos finitos.

Abstract

Queiroz, Marcos Souza Mendes; Roehl, Deane de Mesquita (Advisor). **Numerical modeling of reinforcement of pipelines with use of composite materials.** Rio de Janeiro, 2006, 114p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a numerical model for the investigation of pipe constituted by composite materials. A special class of composite materials, functionally graded materials (FGM), is considered. The composite material model is based on the rule of mixture and an elastoplastic material behavior is incorporated. A finite element model based on the beam element discretization is employed, by which the section integration allows the representation of the non-linear material behavior. This methodology is applied to the analysis of reinforced and repaired pipelines. The soil-structure interaction, accomplished through transversal and longitudinal springs, besides transversal, axial and pressure loading are incorporated. Some examples, simulating the conditions in field, are shown and discussed in order to evaluate the behavior of reinforced pipes, proposing the solution more efficient in modeling of the reinforcement, included in terms of the functionally graded materials .

Keywords

Numerical modeling; composite materials; functionally graded material; rule of mixture; pipe reinforcement and repair; finite elements.

Sumário

1	Introdução	24
2	Reforço e reparo de dutos	30
2.1	Introdução	30
2.2	Materiais compósitos	34
2.2.1	Análise mecânica	35
2.2.1.1	Micromecânica dos compósitos	36
2.2.1.2	Macromecânica dos compósitos	37
2.3	Materiais com Gradação Funcional (FGM)	37
2.3.1	Introdução	37
2.3.2	Modelos	40
2.3.2.1	Método dos elementos finitos gradados	40
2.3.2.2	Método de Tutuncu & Ozturk	42
2.3.2.3	Método de Afsar e Sekine	44
2.3.2.4	Método de Jabbari	45
2.3.2.5	Modelo TTO	46
3	Dimensionamento do reforço do duto, em FGM	52
3.1	Efeitos das pressões interna e externa	52
3.1.1.	Dutos em materiais homogêneos	52
3.1.2	Dutos em FGM	53
3.2	Efeitos da variação de temperatura	54
3.3	Efeitos do momento fletor	55
3.4	Critérios de escoamento	57

3.5	Resistência do duto defeituoso	58
3.5.1	DNV RP-F101	59
3.5.2	ASME B31G	60
3.5.3	085dL	61
3.5.4	Effective area	61
3.6	Dimensionamento do reforço de dutos em material compósito	62
4	Modelo	65
4.1.	Fundamentação teórica	65
4.2.	Comportamento elástico do material	66
4.3.	Comportamento inelástico do material	67
4.4.	Avaliação incremental das tensões	70
4.5.	Elemento do solo	72
4.6.	Elemento da estrutura	73
5	Exemplos numéricos	80
5.1	Exemplo 1	81
5.2	Exemplo 2	88
5.3	Exemplo 3	93
5.4	Exemplo 4	97
5.5	Exemplo 5	104
6	Conclusões e sugestões	109
7	Referências bibliográficas	111

Lista de figuras

Figura 1-1 – Causas de danos em dutos (CONCAWE, 2002)	26
Figura 1-2 – Registro de danos em linhas de dutos	27
Figura 2-1 – Aplicação do produto <i>in loco</i> – <i>Strongback</i> .	33
Figura 2-2 - Etapas da execução do reparo (RESIDUTO, 2005)	33
Figura 2-3 – Detalhes executivos e da estrutura (CLOCKSPRING, 2005)	34
Figura 2-4 - Elemento Representativo de Volume (RVE)	36
Figura 2-5 – Placa simétrica de FGM WC-Co (GASIK et al, 2003)	38
Figura 2-6 – Microestrutura típica de uma amostra em FGM (YIN et al, 2004).	39
Figura 2-7 – Vista lateral da estrutura cilíndrica em FGM	40
Figura 2-8 – Camadas de um duto em FGM	44
Figura 2-9 – Curva tensão-deformação dos materiais no modelo TTO (JIN, 2003)	48
Figura 2-10 – Gráfico Fração Volumétrica da Fase 2 do FGM (V2) Versus Posição radial normalizada (R), em função de p.	49
Figura 2-11 – Gráfico Módulo de elasticidade do FGM em Ti-TiB Vs.Posição radial normalizada.	50
Figura 2-12 – Gráfico Módulo de elasticidade do FGM em Ni-Al ₂ O ₃ Vs.Posição radial normalizada	51
Figura 3-1 - Elementos do tubo com n elementos.	53
Figura 3-2 – Viga deformada, em estado de flexão pura	55

Figura 3-3 – Gráfico Momento fletor X Curvatura da viga (LUBLINER, 1990).	56
Figura 3-4 – Sólido de von Mises no espaço das tensões principais	57
Figura 3-5 - Estrutura do duto com reforço (ARMOR PLATE, 1998)	62
Figura 4-1 - Deformações de viga, sem o efeito do cisalhamento (SOUZA, 2005)	65
Figura 4-2 - Referencial Lagrangeano Total (SOUZA, 2005)	66
Figura 4-3 - Discretização da seção transversal do conjunto duto-reforço	70
Figura 4-4 – Procedimento de cálculo da tensão total no regime elástico	71
Figura 4-5 - Modelo de interação solo-duto (SOUZA, 2005)	72
Figura 4-6 – Elemento de viga tridimensional (SOUZA, 2005)	73
Figura 5-1 - Modelo do duto (SOUZA, 2005)	81
Figura 5-2 – Discretização da seção transversal do duto em 32 elementos	83
Figura 5-3 – Diagrama de deslocamento vertical ao longo do duto ($M_z = 100.000 \text{ N.m}$)	84
Figura 5-4 – Diagrama da deformação vertical ao longo do duto ($M_z = 250.000 \text{ N.m}$).	86
Figura 5-5 – Gráfico Momento fletor máximo X N° de elementos axiais	87
Figura 5-6 – Perfil longitudinal do duto sob carregamento externo, pressão interna e variação de temperatura (SOUZA, 2005).	88
Figura 5-7 – Diagrama do deslocamento vertical ao longo do duto, com e sem o efeito da interação solo-duto	92
Figura 5-8 – Linha de duto enterrado, submetida à pressão interna (DEMPSEY, 2001)	93
Figura 5-9 – Gráfico Tensão circunferencial total máxima no duto (σ_d) X Pressão interna admissível ao duto (P_0)	96
Figura 5-10 – Seção do duto submetido à pressão interna e à variação térmica	97

Figura 5-11 – Gráfico Pressão de contato X Raio externo necessário ao reparo (FGM)	100
Figura 5-12 – Gráfico Tensão circunferencial do duto X Raio externo do reparo.	101
Figura 5-13 – Gráfico Tensão circunferencial no reparo X Raio externo do reparo (FGM)	101
Figura 5-14 – Gráfico Tensão circunferencial no reparo X Raio admissível ao reparo para $p=0.1; 1.0; 10.0$ / $q=4.5; 45.0; 100$ GPa.	102
Figura 5-15 – Gráfico Tensão circunferencial no duto X pressão de operação no duto	107
Figura 5-16 – Gráfico Tensão circunferencial no duto reforçado X raio externo do reforço	107
Figura 5-17 – Gráfico Tensão circunferencial máxima no reforço X raio externo do reforço ($p=10; q=4.5$ GPa).	108

Lista de tabelas

Tabela 2-1 – Propriedades dos materiais constituintes do <i>FGM</i> em <i>Ti-TiB</i>	50
Tabela 2-2 – Propriedades dos materiais constituintes do <i>FGM</i> em <i>Ni-Al₂O₃</i> .	50
Tabela 5-1 – Propriedades da seção do duto	81
Tabela 5-2 – Propriedades do material do duto	82
Tabela 5-3 – Valores dos deslocamentos e rotações nodais para o duto submetido a um momento aplicado de 100.000 N.m nas extremidades.	83
Tabela 5-4 – Momento fletor na seção de deslocamento vertical máximo ($x_2 = 25$ m)	84
Tabela 5-5 – Valores dos deslocamentos e rotações nodais para o duto submetido a um momento aplicado de 250.000 N.m nas extremidades	85
Tabela 5-6 – Momento fletor na seção de deslocamento vertical máximo ($x_2 = 25$ m)	86
Tabela 5-7 – Propriedades da seção do duto	88
Tabela 5-8 – Propriedades do material do duto	89
Tabela 5-9 – Carregamentos externos sob o duto	89
Tabela 5-10 – Constantes da mola do solo (SOUZA, 2005)	89
Tabela 5-11 – Valores dos deslocamentos nas direções axial (x_1) e transversal vertical (x_2) obtidos da análise sem mola do solo	90
Tabela 5-12 – Valores dos deslocamentos nas direções radial (x_1) e transversal vertical (x_2) obtidos da análise com mola do solo.	91
Tabela 5-13 – Propriedades geométricas e materiais do duto e solicitações.	93

Tabela 5-14 – Propriedades dos materiais do reparo.	94
Tabela 5-15 – Propriedades mecânicas na linha do duto	94
Tabela 5-16 – Propriedades geométricas e materiais do duto – API 5L-X70.	97
Tabela 5-17 – Propriedades dos materiais do reparo	98
Tabela 5-18 – Propriedades do material compósito empregado no reparo	98
Tabela 5-19 – Propriedades e solicitações no duto	104
Tabela 5-20 – Propriedades do material compósito (SILVA, 2002)	104

Lista de símbolos

V_f, V_m	Fração volumétrica da fibra e da matriz
E_c	Módulo de elasticidade do compósito
E_f	Módulo de elasticidade da fibra
E_m	Módulo de elasticidade da matriz
E_P	Módulo de elasticidade do compósito na direção paralela ao reforço
E_T	Módulo de elasticidade do compósito na direção perpendicular ao reforço
$[C]$	Tensor tensão-deformação
$[B]$	Matriz deformação-deslocamento
N	Função de forma
$[K]$	Matriz de rigidez
J	Jacobiano
$[F]$	Vetor de forças nodais
E_0	Módulo de elasticidade na superfície externa de uma estrutura em FGM
E	Módulo de elasticidade
H	Módulo de encruamento
H_0	Módulo de encruamento da fase 2 do FGM
P_i	Pressão interna ao duto
P_e	Pressão externa ao duto

T	Temperatura
M_U	Momento último
A	Área do defeito no duto
A_0	Área da seção transversal original do duto
M	Fator de Folias
D	Diâmetro externo do duto
L	Comprimento do duto
F_x	Esforço axial no duto
M_y	Momento fletor no duto
L_c	Comprimento circunferencial da corrosão
L_{ef}	Extensão axial da área efetiva
E_r	Módulo de elasticidade do material do reparo
E_d	Módulo de elasticidade do material do duto
V	Volume do elemento
S	Tensor de Piola-Kirchhoff
E_T	Módulo de elasticidade tangente
G	Módulo de elasticidade transversal
C^{EP}	Matriz constitutiva elastoplástica
\bar{S}	Tensão efetiva
F_{BS}	Força incremental de compressão do solo na base do duto
F_{US}	Força incremental de compressão do solo no topo do duto
F_{LLS}	Força incremental de compressão do solo na lateral esquerda do duto
F_{RLS}	Força incremental de compressão do solo na lateral direita do duto

F_{AS}	Força incremental de compressão do solo no sentido axial do duto
K_{BS}	Elemento de rigidez do solo na base do duto
K_{US}	Elemento de rigidez do solo no topo do duto
K_{LLS}	Elemento de rigidez do solo na lateral esquerda do duto
K_{RLS}	Elemento de rigidez do solo na lateral direita do duto
K_{AS}	Elemento de rigidez do solo no sentido axial do duto
F_{YBS}	Força de escoamento do solo na base do duto
F_{YUS}	Força de escoamento do solo no topo do duto
F_{YLLS}	Força de escoamento do solo no lado esquerdo do duto
F_{YRLS}	Força de escoamento do solo no lado direito do duto
F_{YAS}	Força de escoamento do solo no sentido axial do duto
F_{eq}	Força axial equivalente
M_{eq1}	Momento fletor equivalente em torno do eixo x_2
M_{eq2}	Momento fletor equivalente em torno do eixo x_3
R_T	Matriz de rotação para pórtico espacial
R_G	Vetor de forças externas
M_p	Momento de plastificação
I	Momento de inércia da seção transversal do duto
M_z	Momento aplicado em torno do eixo x_3
M_P	Momento de plastificação
C_d	Coeficiente do empuxo de terra

B_d	Largura da vala de topo do duto
P_0	Pressão de operação do duto
P_1	Pressão de contato entre o duto e o reforço
P_{0p}	Pressão interna limite em regime elástico de dutos
m	Número de nós do elemento
r, z	Eixos das coordenadas globais
u	Deslocamento na direção x_1
v	Deslocamento na direção x_2
w	Deslocamento na direção x_3
$[u]$	Vetor global de deslocamentos nodais
$[q]$	Vetor local de deslocamentos nodais
m_1, m_2	Raízes da equação de Euler-Cauchy
p	Coefficiente de não-homogeneidade do FGM
n_0	Expoente de endurecimento do metal
r_0	Raio interno do duto
q	Coefficiente de transferência do FGM
r_1	Raio externo do duto / raio interno do reforço
r_2	Raio externo do reforço
u_r	Deslocamento radial
r_i	Raio interno do duto
r_e	Raio externo do duto
r	Posição radial
t	Espessura do duto
d	Profundidade máxima da corrosão
t_d	Espessura do duto

t_r	Espessura do reparo
e	Tensor de deformações de Green-Lagrange
x_1	Eixo axial do duto
x_2, x_3	Eixos transversais do duto
h	Funções de Hermite
u_e	Vetor dos deslocamentos nodais
k_m	Coeficiente do momento fletor
k_d	Coeficiente de deflexão
r_0	Raio interno do duto
r_1	Raio externo do duto / interno do reforço
r_2	Raio externo do reforço
σ	Tensão normal
σ_Y	Tensão de escoamento
σ_0	Tensão de escoamento da fase 2 do FGM
σ_θ	Tensão circunferencial
σ_r	Tensão radial
σ_x	Tensão axial
σ_{eq}^M	Tensão equivalente (Von Mises)
σ_p	Tensão de ruptura
σ_u	Tensão última
σ_d	Tensão circunferencial no duto
σ_r	Tensão circunferencial no reparo
Δ_{BS}	Deslocamento (compressão) na base do duto
Δ_{US}	Deslocamento (compressão) no topo do duto

Δ_{LLS}	Deslocamento (compressão) na lateral esquerda do duto
Δ_{RLS}	Deslocamento (compressão) na lateral direita do duto
Δ_{AS}	Deslocamento (compressão) no sentido axial do duto
σ_{pi}	Tensão circunferencial devido à pressão interna
σ_s	Tensão circunferencial devido ao solo
ν	Coeficiente de Poisson
ε	Deformação
ξ, η	Eixos das coordenadas locais
ε^*	Deformação residual no FGM
η_1, η_2	Raízes da equação de Navier
α	Coeficiente de dilatação térmica
ε_θ	Deformação circunferencial
ε_r	Deformação radial
ρ	Raio de curvatura da viga
κ	Curvatura da viga
θ_c	Razão entre os comprimentos circunferenciais da corrosão e do duto
θ, r, x	Direções circunferencial, radial e axial
$d\varepsilon_{rs}$	Deformação incremental total
$d\varepsilon_{rs}^E$	Componente elástica da deformação incremental
$d\varepsilon_{rs}^P$	Componente plástica da deformação incremental
Φ	Função de escoamento
ε^P	Deformação plástica incremental

ε_θ	Componente circunferencial da deformação
ε_r	Componente radial da deformação
ε_x	Componente axial da deformação
θ_y	Rotação em torno do eixo x_2
θ_z	Rotação em torno do eixo x_3
ε_0	Deformação axial
ϕ_y	Curvatura em torno do eixo x_2
ϕ_z	Curvatura em torno do eixo x_3
γ	Peso próprio unitário do solo

Lista de siglas

<i>FGM</i>	<i>Functionally Graded Materials</i>
<i>a.C.</i>	<i>Antes de Cristo</i>
<i>NTSB</i>	<i>National Transportation Safety Board</i>
<i>CONCAWE</i>	<i>Conservation of Clean Air and Water in Europe</i>
<i>PIG</i>	<i>Pipeline Inspection Gauge</i>
<i>API</i>	<i>American Petroleum Institute</i>
<i>GRI</i>	<i>Gas Research Institute</i>
<i>DOT</i>	<i>Department of Transportation</i>
<i>RVE</i>	<i>Representative Volume Element</i>
<i>HOT</i>	<i>Higher-Order Theory</i>
<i>TTO</i>	<i>Tamura-Tomato-Ozawa</i>
<i>DNV</i>	<i>Det Norske Veritas</i>
<i>ASME</i>	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
<i>L.T</i>	<i>Lagrangeana Total</i>
<i>RMDI</i>	<i>Reduced Modulus Direct Integration</i>
<i>REDUCT</i>	<i>Repair of Duct</i>

“O Mistério não é um muro onde a
inteligência esbarra, mas um oceano
onde ela mergulha”.

(Gustav Thibon)