



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

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.



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 Sil SSSe nt DsãgB619 06 Td (D)Tj

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 elasto-plástico	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 ($M_z = 100.000 N.m$)	84
Figura 5-4 – Diagrama da deformação vertical ao longo do duto ($M_z = 250.000 N.m$).	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 $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$.	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	Coefficiente 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
$P_{0,p}$	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	Coefficiente 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	Coefficiente 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>	Antes de Cristo
<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>	Tamura-Tomato-Ozawa
<i>DNV</i>	Det Norske Veritas
<i>ASME</i>	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
<i>L.T</i>	Lagrangeana Total
<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)

1

Introdução

Dutos (do latim *ductu*; “aquilo que conduz”) são sistemas de canalização utilizados no transporte de fluidos. Originalmente, tinham o objetivo de captar e conduzir água (os chamados aquedutos) de uma região a outra. Diversas civilizações antigas – Assíria, Fenícia, Grécia e Roma – utilizavam tais estruturas no abastecimento de água, algumas constituindo uma rede complexa e extensa, como a que supria Roma no século I (cerca de 440 km). Na China, em 400 a.C., os bambus perfurados eram também empregados na distribuição de gás natural para a iluminação pública de Pequim (HIPPERT, 2004).

Nos dias de hoje, os dutos são amplamente empregados no transporte de gás, petróleo e seus derivados, integrando-se assim a setores econômicos estratégicos, como o setor petroquímico e o energético. Desta maneira, é indispensável que os mesmos operem com eficiência e segurança, atendendo tanto às questões técnicas e econômicas quanto aos aspectos ambientais.

A estrutura de produção e abastecimento de petróleo e derivados interliga, através de várias modalidades de transporte, três pontos distintos: os poços de produção, as refinarias e os centros de consumo. Destes pontos, apenas as refinarias apresentam flexibilidade quanto à definição de sua localização, em face de uma análise sócio-econômico-ambiental. Assim, considerando que a distância entre os centros de consumo e os poços de produção possa ser significativa, é necessário dispor de uma vasta infra-estrutura de distribuição para garantir a eficiência do abastecimento de energia.

A ampla utilização de dutos no transporte de fluidos deve-se a duas características principais: custo e segurança. Apesar do elevado investimento inicial para construção e instalação das linhas, foi constatado por COSHAM (2002) que o transporte de combustíveis fósseis por meio de malhas de dutos é consideravelmente mais barato do que as demais alternativas de modalidades de transporte (avião, navio, trem ou caminhão). O outro aspecto relevante diz respeito à segurança. Dutos se apresentam como o meio de transporte mais seguro, confiável e de maior regularidade para o transporte de grandes quantidades de óleo e gás natural através de vastas extensões territoriais, segundo dados do Gabinete para a Segurança de Dutos do órgão norte-americano *National Transportation Safety Board* (NTSB, 2002). É importante salientar que uma maior segurança nos

sistemas dutoviários acarreta em menor registro de acidentes e, com isso, redução de perda de recursos no transporte, além de menor risco de danos ambientais devido a vazamentos.

Os tubos utilizados na indústria de petróleo são geralmente classificados através do *API (American Petroleum Institute)* conforme sua aplicação, composição química e resistência mecânica (SILVA, 2004). Os aços utilizados na fabricação de tubos para linhas de transmissão, especificamente, seguem a classificação *API-5L (Specification for line pipe steel)*, abrangendo tubos adequados para transporte de gás, água e óleo às indústrias de petróleo e gás natural, e levando em consideração a rota de processamento do tubo (tubos sem costura, com costura, com solda em espiral, etc.). Estes tubos são fornecidos em diâmetros externos nominais que variam de 3 a 1.240 mm (1/8 a 49") e são utilizados principalmente no transporte de óleo e gás. Para a classe 5L, os graus de composição química e resistência mecânica variam desde *API-5L-A25* até o moderno *API-5L-X80*. Nas designações compostas pelas letras A ou X, os dois últimos dígitos especificam valores mínimos de limite de escoamento do material, em unidades inglesas ($1.000 \text{ lb/in}^2 = 1 \text{ ksi}$). Desta forma, os tubos classe *API-5L-X70* apresentam valor mínimo de tensão limite de escoamento igual a 70 ksi (480 MPa).

Na construção dos novos dutos terrestres, vêm-se empregando tubos de grandes diâmetros e espessura reduzida que operam sob alta pressão, permitindo um ganho de produtividade pelo aumento do volume de fluido transportado. Isto somente se tornou possível com o desenvolvimento contínuo de aços microligados, com elevadas características de soldabilidade, resistência mecânica e tenacidade.

Embora tal configuração de tubos de grandes diâmetros e paredes finas constitua um avanço de projeto em termos de desempenho econômico das linhas, deve-se atentar aos desafios tecnológicos relacionados. O aumento da resistência mecânica do material permite a operação da linha de dutos em pressões mais elevadas sem ocorrência do colapso plástico da estrutura. No entanto, pressões elevadas geram um estado de tensões bastante severo sobre um defeito potencialmente presente no material do tubo, e a extensão estável deste dano sobre uma parede de espessura reduzida pode acarretar em falha da estrutura, uma vez que a margem de propagação é significativa. Assim, no decorrer do tempo, os dutos ficam sujeitos a danos que podem comprometer sua integridade estrutural e suas perfeitas condições operacionais.

O Grupo de Gerenciamento de Oleodutos da *CONservation of Clean Air and Water in Europe* (CONCAWE), organização europeia que congrega diversas companhias petrolíferas, elaborou um relatório com estudos estatísticos sobre acidentes em linhas de oleodutos ocorridos entre 1971 e 2000 (CONCAWE, 2002). O referido relatório, relacionado com informações de vinte e um países da Europa Ocidental, em dutos de comprimento superior a 2 km de extensão, excluindo sistemas submarinos, registrou 379 casos neste período, com volume de vazamento superior a 1m³ em cada ocorrência.

Danos em dutos - 1971-2000

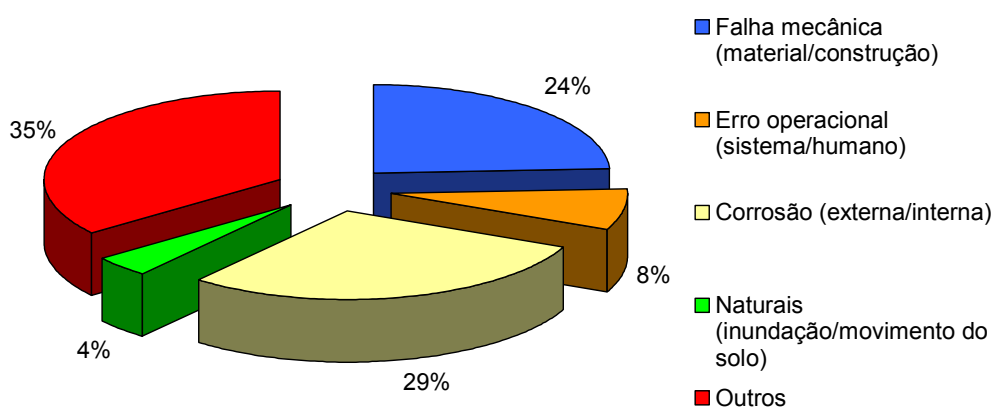


Figura 1-1 – Causas de danos em dutos (CONCAWE, 2002).

Dentre as principais causas de danos, conforme apurado por CONCAWE (2002) em diversas linhas de dutos (Fig. 1-1), destacam-se: a corrosão (29%); falhas mecânicas (24%), como defeitos de fabricação, falhas de projeto; erros operacionais (8%); ações naturais, tal como o movimento do solo (4%); entre outros (35%). A mais freqüente destas em particular – a corrosão – pode ser provocada por falhas na proteção catódica ou por danos no revestimento de proteção ou ainda pela presença de umidade no produto transportado.

Como medida de segurança, realiza-se o monitoramento periódico da integridade das tubulações através de um equipamento chamado *PIG*, com registro dos dados por meio de sensores ou varreduras por ultra-som. Faz-se necessária, além da realização de inspeção instrumentada, a aplicação de um método de

avaliação estrutural, a fim de se obter um diagnóstico da integridade do duto. Em casos onde a pressão admissível verificada num segmento de duto com corrosão é menor do que a pressão de operação, deve-se reforçar o duto ou reduzir a pressão operacional. Desta maneira, a atividade de integridade estrutural de dutos deve consistir do gerenciamento e organização de um conjunto de medidas com o intuito de garantir os níveis satisfatórios de confiabilidade operacional (CORREIA & FERREIRA, 2004).



Figura 1-2 – Registro de danos em linhas de dutos.

Diversas técnicas de recuperação e/ou reforço de dutos foram propostas ao longo dos anos, como os conectores mecânicos, a braçadeira bipartida, a remoção do defeito por trepanação, o corte e a substituição, a dupla calha soldada, a dupla calha com enchimento e, mais recentemente, a aplicação de camadas de uma classe de materiais de excepcionais características, os materiais compósitos.

Os materiais compósitos são provenientes da combinação sinérgica de dois ou mais materiais distintos, com intuito de se obterem propriedades pré-determinadas, diferentes das encontradas nos seus constituintes isoladamente. Uma destas fases, que confere rigidez e resistência ao material, é denominada reforço. Já o segundo material componente, cuja finalidade é unir e proteger o reforço de agentes externos, chama-se matriz.

Dentre os materiais compósitos, destaca-se um grupo singular de características inovadoras, com variação contínua de suas propriedades ao longo de sua espessura, denominado materiais com gradação funcional (*functionally graded materials*, FGM). Tais materiais caracterizam-se pela otimização que conferem à estrutura, podendo resultar em sistemas mais leves e esbeltos, além de apresentarem uma menor incidência de concentração e/ou descontinuidade das tensões.

Como elementos motivadores a este trabalho, destacam-se a manutenção do elevado nível de resistência termo-mecânica exigido numa linha de duto; a reabilitação de dutos danificados em caráter permanente, com intuito de garantir a confiabilidade operacional da estrutura; e a adaptação dos dutos a eventuais mudanças nas solicitações originais.

O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de uma metodologia eficiente para o dimensionamento do reforço e do reparo de dutos com emprego dos materiais compósitos com gradação funcional, além da análise do comportamento estrutural do sistema duto-reforço submetido às condições usuais de carregamento numa linha de duto. O referido sistema estrutural é tratado como um elemento de viga tridimensional com capacidade para tração, compressão e flexão. São incorporados ao modelo matemático os efeitos da não-linearidade geométrica e material na análise das tensões e deformações no duto e no reforço. A formulação proposta foi implementada em um sistema para análise de dutos enterrados desenvolvido no âmbito das dissertações de mestrado de MEJÍA (2003), LÁZARO (2004) e SOUZA (2005).

No capítulo 2 deste trabalho, são tratadas as técnicas usuais de reforço de dutos, em particular a que utiliza os materiais compósitos de fibra de vidro com resina polimérica. São apresentados também os modelos utilizados na previsão das propriedades dos materiais com gradação funcional.

Propõe-se, no Capítulo 3, um critério de dimensionamento de reforço de dutos com emprego de um grupo inovador de materiais compósitos, denominados materiais com gradação funcional.

No capítulo 4, é apresentada a modelagem numérica da estrutura do reforço proposta pela pesquisa, mostrando as hipóteses fundamentais; a descrição cinemática (relações deformação-deslocamento) e do material (relações

constitutivas) para o e

! " \$ # % & # # " !
% # & # \$ # "
.
("
O "
("
(* % "
O "
("
(+ "
, #
-
, #
• *
. & #
- &
/!

"

 •

 2 !

 '

 # "

 •

 '

 #

 ' #

 3 # #

 "

 * # #

 # 3 "

 3 "

 4 5# #

 5

 3, 4. 6' 7889 / -: -

 ; 5 !

 4 # 5

 <8

 3 # # & ; -

 # = -

 3>' , ?@A B

 >4?, ? 7881 ' - 3C?@1<<D

 ! #

 C?@E ?' > !

 5 3F4. F' 7889 4 4,

 3 , 5# # ;

 .

 # &

,

5

\$

!

3, 4. 6' 7889

4

5

&

•H

3

&

*

. &

' 2 #

2 # 2

3F, ?4I CJ' *A 788K



) # 721 L'

4

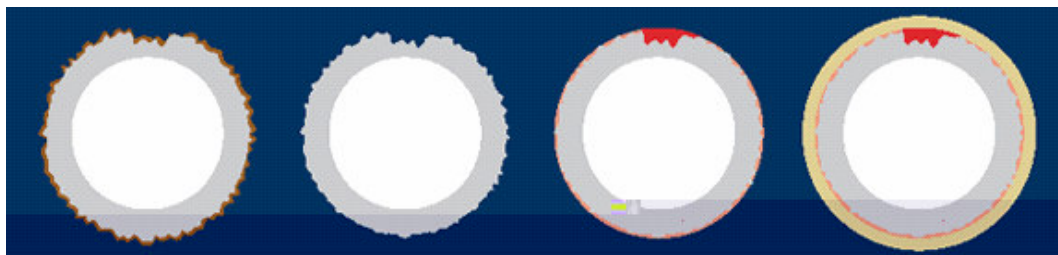
5

#

5

3?. F,

788K



>

? #

&

?

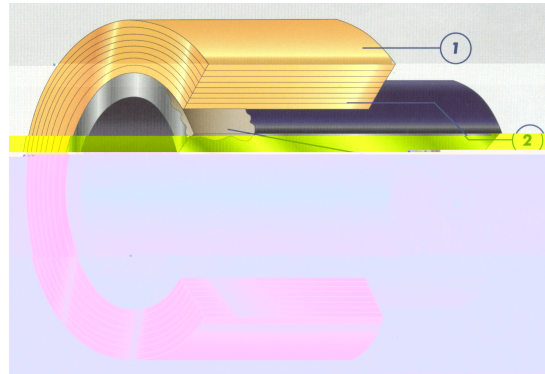
! "#\$

5

) # 727 2

3? F@ . , 4 788K

• >
 * #
 " & #
 " C
 5 - " " &
 5 " &
 3*H4*AF>?@ C 788K



) # 720 L

3*H4*AF>?@ C 788K

+ 5 - &
 2 # 2
 4 2 5 - # &
 # & #
 5 M
 . 5
 G -
 2 & #
 I 2 & -
 #
 5 I 5 #

OK

! # -
 &
 . #
 # - -
 3H4. ? @4 1<<<
 ' # # 5
 & "
 \$ - "
 " 3F4J?@ /4 788K

> # 5
 ;

- 2#
- *2C
- F2C
- ' ?2C

\$!# "
 ! "
 # &
 ! &

\$ 2 # \$ 5
 ! G
 + G *
 F 2 # ! G
 - 5
 G G
 G #
 5

4

G

ON

. ! G
5

? # + - #

(& = (% ' % + (' 37 1

(& & (% & (5

3 & " ' % & ' & 5

' ! G

5 ! .
5 3C@F4I 1<<0

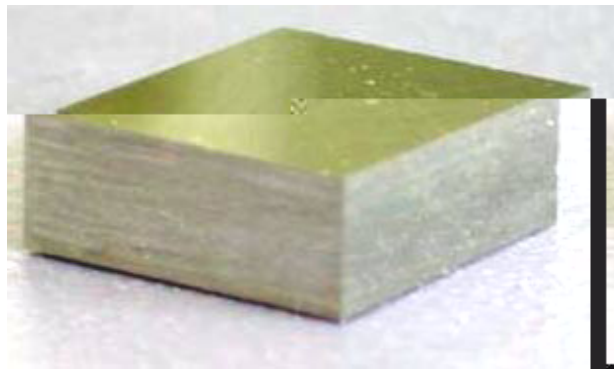
> \$) = \$ % ' % + \$ ' 37 7

' $\frac{\$ \#}{\$} = \frac{\$ \%}{\$} + \frac{\$}{\$}$ 37 0

' 5

OD

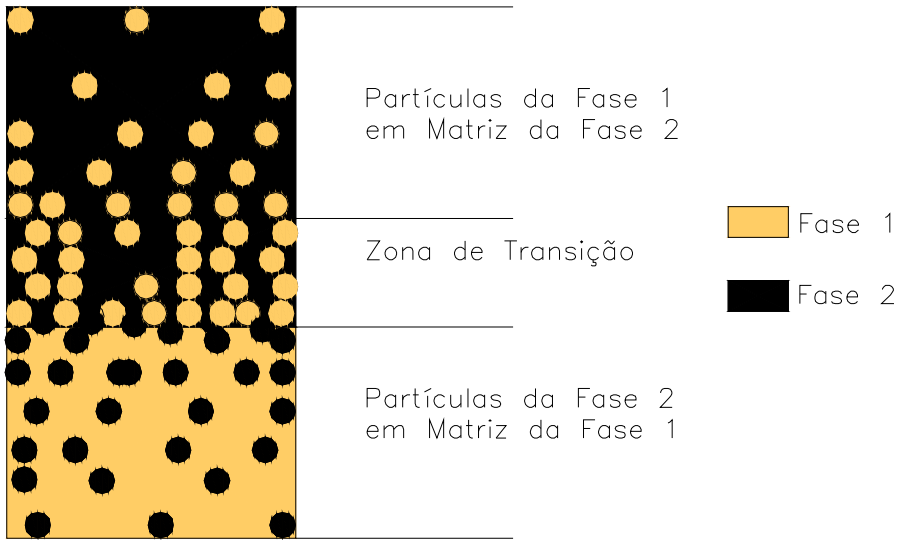
4 D8
 T # -
 2
 + # % , - % . / %
 0 % # 3A' E ' F' A@B E ' , ' I ' J 1<<K I
 2)C+ & !
 , & !
 = \$ 5



)# 72K L >)C+ E *2* 3C' F@ 7880
 # 5 #
 % 1 -
 \$ & G "
 % 2 - G
 # ! ' #
 % ; ; \$
 F)C+ ;
 " " #
 " ; 3*/4 B /' 7881" I' ' . B) ??' ?@
 1<<<
 ')# 72N - !
 5 # ;
 # ; I
 & 7 1
 F 7 % 3

0<

- 1 4 | #
! 4 35
) ! - !
1
7 1 7 &

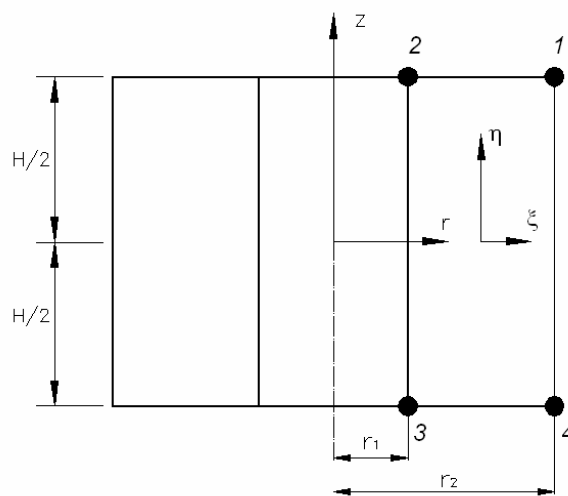


) # 72N L +)C+ 3U@ 7889
J # 5
+4?, I F I B F. ? F/ 31<<K '
&#
!
2
5' " T! # #
& V

)C+ 4
" " # "
2 # #

> #
 # 5
 #
 + 2, S 3*/4 B /'
 7881 ' # \$
 & 3*' O' H*' I , 788N 4
 #
 & #
)C+ & ! 3U@
 7889
 F # # # !
 G)C+
 "
 #
 > - H@B W4. 31<<D A@ B >' . H@ 4 37887
 ! #
 & #
 5 #
 > 2

3) # 720



) # 720 L O

)C+

! ;

& 2 []
- #

$$[+] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} & \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \eta} & \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \\ \phi & \phi \end{bmatrix}$$

37 K

! & []

$$[] = \frac{8 - \nu 7}{8 + \nu 7} \begin{bmatrix} \frac{\nu}{8 - \nu 7} & \frac{\nu}{8 - \nu 7} \\ \frac{\nu}{8 - \nu 7} & \frac{\nu}{8 - \nu 7} \end{bmatrix}$$

37 N

3ξ,η 2 # 3 & 4

$$= \sum_{\xi, \eta} \phi(\xi, \eta) \quad 37 Q$$

$$4 = \sum_{\xi, \eta} \phi(\xi, \eta) \quad 37 Q$$

6 ; 5 = 5

> #

$$= \sum_{\xi, \eta} \phi(\xi, \eta) \quad 37 D$$

$$9 = \sum_{\xi} 6 (\xi \eta) 9$$

37 D

- 8 & 97

&

$$= \sum_{\xi} (\xi \eta)$$

37 <

$$v = \sum_{\xi} (\xi \eta) v$$

37 <

8\$ & v 7

5

- 7K 7N 7 <

T 3 :

2 & # & [C]

$$[C] = \int \int_{\xi} [+] [] \# [+] : \xi \eta$$

37 18

& # &

#

& # &

& # & [C]

[.]

& '

#

- ;

$$[C] = [.]$$

37 11

) ; - - #

$$[\sigma] = [,] [\varepsilon] = [,] [+] ;$$

37 17

- [;]

" \$ % & ' (

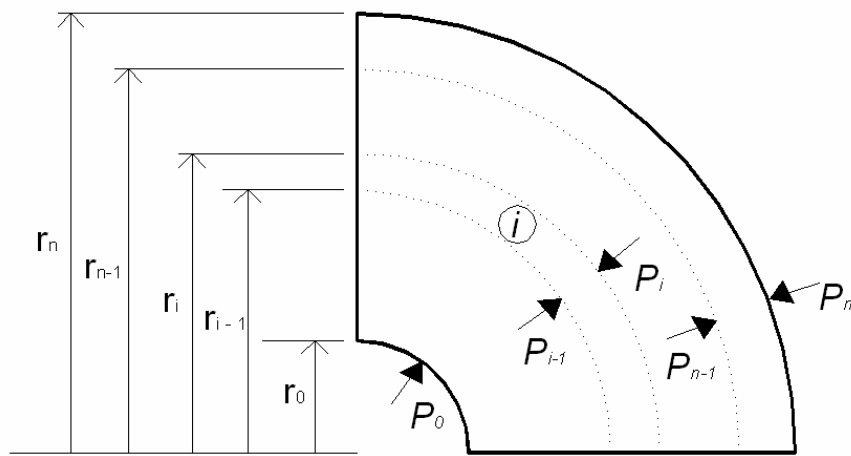
, . . . I * . B 4W, . ? A 37881

!

;) C +

- 2* X & 3

") (') F ' ? B F A @ 37881 #) C + ; 3 ε < F) C + \$ & # 3) # 72D



) # 72D L *) C +

* # ; ;

5 \$ > v

$$\sigma = \frac{P_0}{r} \left[\frac{r_n^2}{r^2} - 1 \right] - \frac{P_n}{r} \left[\frac{r^2}{r_n^2} - 1 \right] \quad 37 \ 10$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_0}{r} \left[\frac{r_n^2}{r^2} + 1 \right] - \frac{P_n}{r} \left[\frac{r^2}{r_n^2} + 1 \right] \quad 37 \ 10$$

$$\sigma_0 = \frac{v}{1-v} \left(\frac{P_0}{r_0} - \frac{P_n}{r_n} \right) - \frac{P_n}{r_n} \quad 37 \ 10$$

$$= \frac{-}{-}$$

37 1D

$$) \% = \% - \<\%$$

37 1D

$$- \% \qquad \qquad \qquad \<\%$$

$$\varepsilon^<$$

&

$$\% = \frac{(+v)(-v)}{\$ (-)} \left[\right) \% \left\{ - + \frac{-}{-v} - \right\} - \left) \% \left\{ - + \frac{-}{-v} - \right\} \right] + (+v)\varepsilon^< \quad 37 1<$$

$$; \qquad \qquad \qquad \% \qquad \qquad \qquad \<\%$$

#

$$- ;$$

$$3 =$$

1

$$\delta_{k-}^{\%} - \% + \delta_{k}^{\%} \% + \delta_{k+}^{\%} + \% =$$

37 78

$$\delta_{k-}^{\%} - \<\% + \delta_{k}^{\%} \<\% + \delta_{k+}^{\%} + \<\% = \left[(+v) \varepsilon^<_+ - (+v) \varepsilon^< \right]$$

37 78

$$= \& \& \& -$$

-

$$\delta_{k-}^{\%} = \frac{(-v)}{\$ (-)}$$

37 71

$$\delta = -\frac{+v}{(-)} \left[+ - v \right] - \frac{+v_+}{(-_+)} \left[+ + - v_+ + \right]$$

37 71

$$\delta_{k+}^{\%} = \frac{+(-v_+)}{\$ (-_+)}$$

37 71

*

" + , ,

T JJ' ?@

37887

;

G

#

-

I

F # ;

; #

$$\sigma = \frac{\$}{(+v)(-v)} \begin{bmatrix} \left(\left((-v)\eta + v\gamma + \eta^+ - \right) + \left((-v)\eta + v\gamma + \eta^+ - \right) \right) + + \\ \left(\left((-v)(-) + \right), -\frac{(+v)\alpha!}{(-v)} \right) + - \end{bmatrix} \quad 37 \ 77$$

$$\sigma_\theta = \frac{\$}{(+v)(-v)} \begin{bmatrix} (v\eta + -v) + \eta^+ - + (v\eta + -v) + \eta^+ - 0 \\ \left((v +), -\frac{(+v)\alpha!}{(-v)} \right) + + \\ \left((v(-) +), -\frac{(+v)\alpha!}{(-v)} \right) + - \end{bmatrix} \quad 37 \ 77$$

- \$ \alpha v " #

2 # " \eta \eta &

- | " ! ! + + , , G

;)C+

- \$\$\$&

> G #

! ;

)C+ &- !

#

)C+ # 2

& , , 4& Y , , 4 3T@

7880

F # ; 3\sigma ; 3\varepsilon 5

3\$ > 3v)C+

L 1 7 L

30

)C+

$$\sigma = \sigma + \sigma \quad 37 \ 70$$

$$\varepsilon = \varepsilon + \varepsilon \quad 37 \ 70$$

$$i = \frac{\sigma - \sigma}{|\varepsilon - \varepsilon|} \quad 37 \ 70$$

$$\nu = \nu + \nu \quad 37 \ 70$$

$$\alpha = \alpha + \alpha \quad 37 \ 70$$

$$= + \quad 37 \ 70$$

$$\$ = \left[\begin{array}{c} \$ \\ \frac{; + \$}{; + \$} + 8 - ' 7 \$ \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \frac{; + \$}{; + \$} + 8 - ' 7 \end{array} \right] \quad 37 \ 70 \#$$

4

; 3 < ; < ∞

G

5

; &

> ; → ∞

- ; =

; 3+4?, IF I B F. ? F/

1 < 0" T@ B 44 F 7889

> ; ! 5 2

G 3 ! # 2 = , , 4 - 5

5 $\sigma_{>}$ 3σ

$$\sigma_{>} = \sigma \left[\begin{array}{c} + \frac{; + \$ \$}{; + \$ \$} 8 - ' 7 \end{array} \right] \quad 37 \ 79$$

> 2 & 5 #

, , 4 - 5 2

5 #

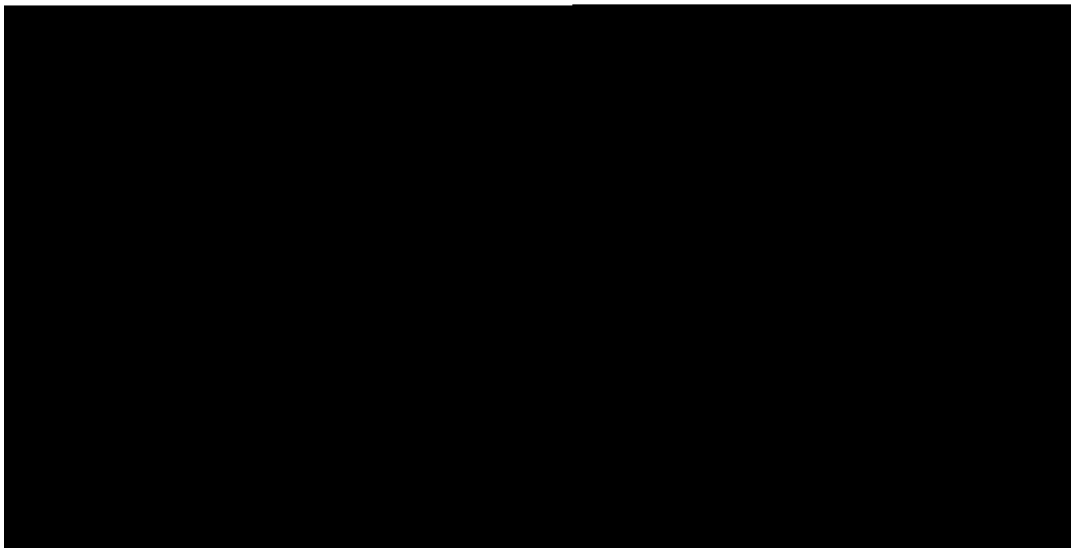
$$= \begin{bmatrix} ; + \$ \\ ; + \$ \end{bmatrix} + 8 - ' 7 \$ = \begin{bmatrix} ; + \$ \\ ; + \$ \end{bmatrix} + 8 - ' 7 \quad 37 7K$$

> 2 #
 -
 ! T@ 37880 2 #
 - ; 2
 5

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = \frac{' \$ \sigma}{; + \$ \sigma_y} + \frac{(; +' \$) \$ \sigma}{(; + \$) \$ \sigma_y} \left(\frac{\sigma}{\sigma} \right) \quad 37 7N$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{' ; + \$ \sigma}{; + \$ \sigma_y} + \frac{' ; \$ \sigma}{(; + \$) \$ \sigma_y} \left(\frac{\sigma}{\sigma} \right) \quad 37 7N$$

') # 72< 2
 5 , , 4



) # 72< L * 2 , , 4 3T@ 7880
 #
 #

I ; 1 7)C+

$$\cdot = \begin{bmatrix} 8 & - 7 \\ 8 & - 7 \end{bmatrix}$$

37 7Q

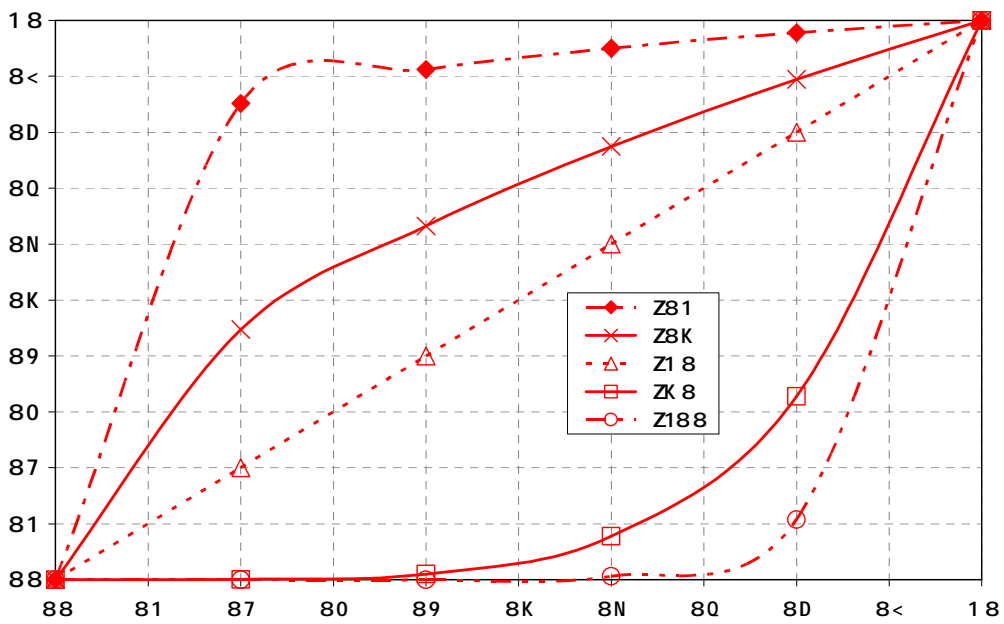
$$\cdot = \begin{bmatrix} 8 & - 7 \\ 8 & - 7 \end{bmatrix}$$

37 7Q

$$= \begin{bmatrix} - \\ - \end{bmatrix}$$

37 7Q

- # # & # 2
 ')# 7218 # 7
)C+ #



)# 7218 LC !) 0) 7)C+ 307 0 >
 & 3?

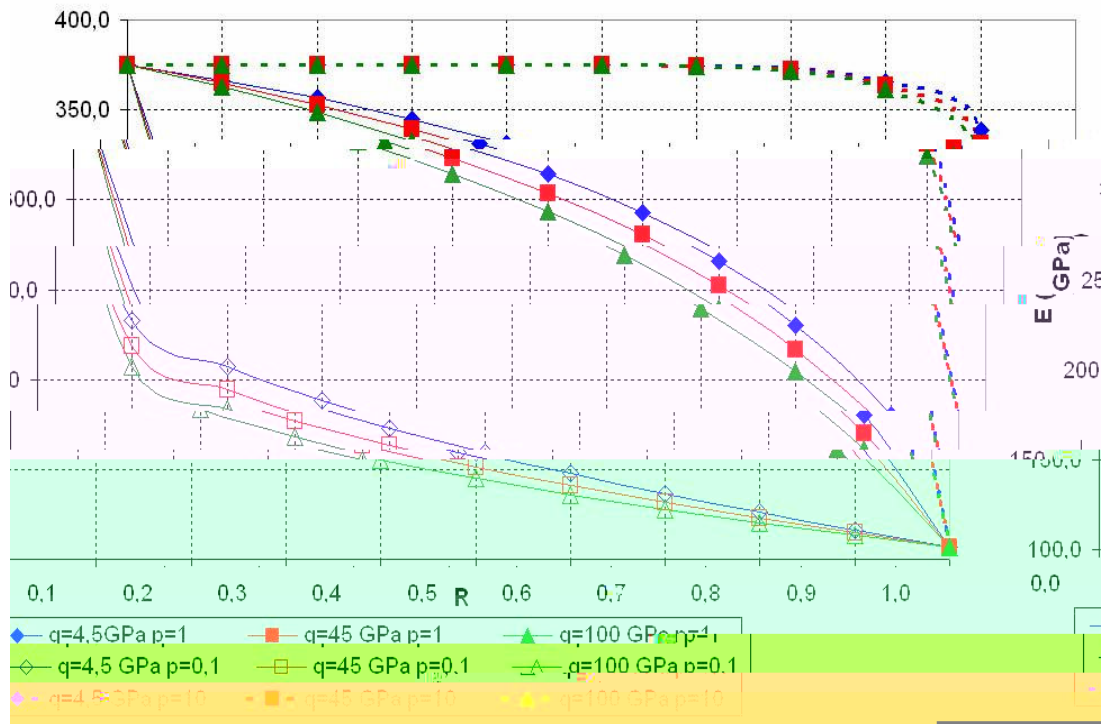
> # G)C+
 5 #
 , 2, J | 2' 740

T 37880

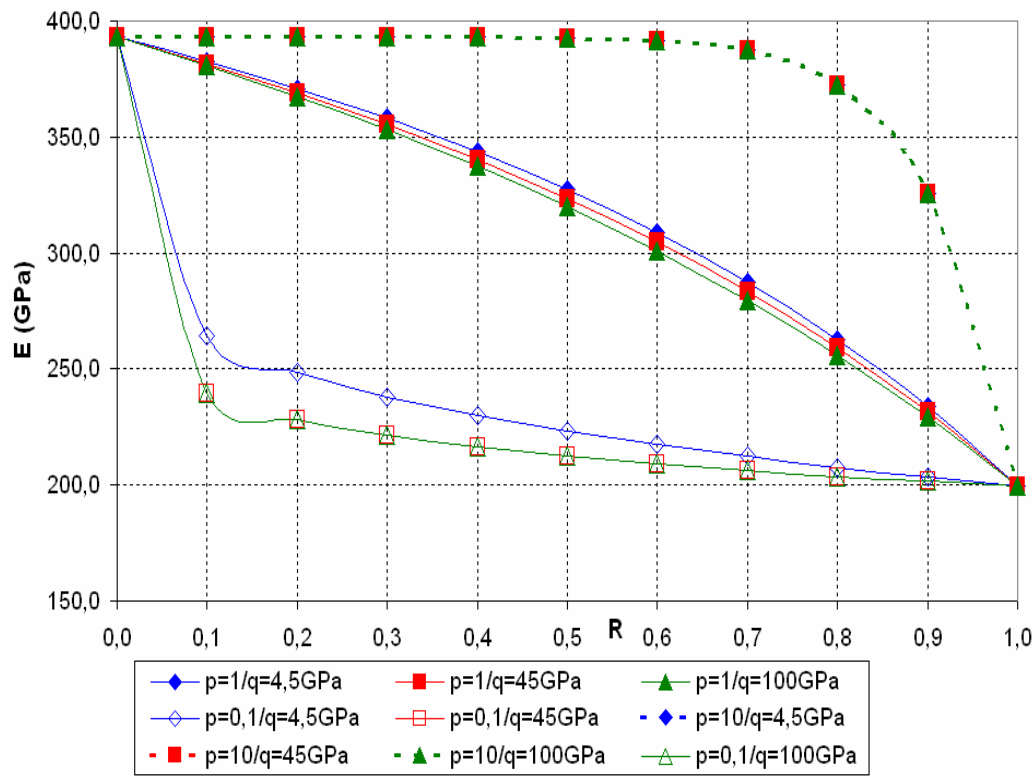
721 L >	/	# # +
<hr/>		
	TiB	Ti
	GPa!	00K
0	/	819
<hr/>		
727 L >	/	2' 740
<hr/>		
	Al₂O₃	Ni
	GPa!	0<0 8
0	/	808
		1<< K
<hr/>		

') # 7211 7217 5

, 2, J | 2' 740



) # 7211 LC ! +5)C+ , 2, J O >
 &



) # 7217 LC ! + 5)C+ I 2' 740 O >
&

— 10

! " # \$ % & ' ()

*+(

*+&

+

,
-

— 10

)

$$\frac{1}{2} \quad 1 \quad \frac{2 \quad 2 \quad 1}{2 \quad 2} \quad 1 \quad \frac{2 \quad 2}{2 \quad 2}$$

*+.

$$\frac{1}{2} \quad 1 \quad \frac{2 \quad 2 \quad 1}{2 \quad 2} \quad 1 \quad \frac{2 \quad 2}{2 \quad 2}$$

*+/
/

$$\frac{1}{2} \quad 1 \quad \frac{2 \quad 2 \quad 1}{2 \quad 2} \quad 1 \quad \frac{2 \quad 2}{2 \quad 2}$$

*+0

$$\frac{2 \quad 2 \quad 1}{2 \quad 2} \quad \frac{2 \quad 2}{2 \quad 2}$$

*+1

/*

$$\frac{\frac{2}{2} \frac{2}{2} \frac{1}{2}}{\frac{2}{2} \frac{2}{2}} \frac{\frac{2}{2} \frac{2}{2}}{\frac{2}{2} \frac{2}{2}}$$

*+2

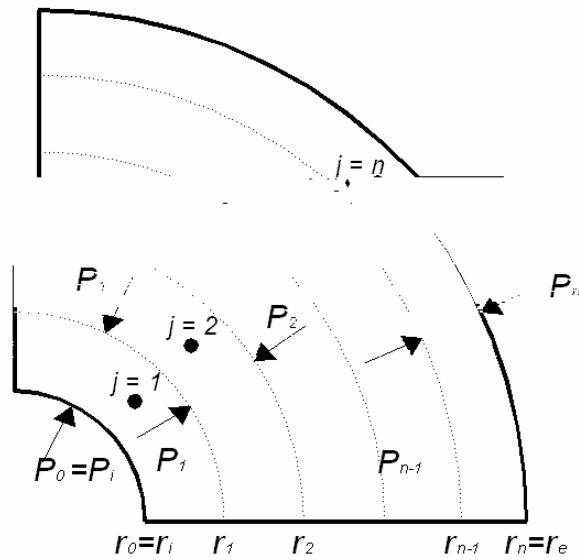
3 +

% 4

5

3 5

- 6 + *1(+



6 *1(1\$

+

8

-

\$ + *+(

&

)

$$1 \frac{\frac{2}{1} \frac{2}{2}}{\frac{1}{2} \frac{2}{2}} \frac{\frac{2}{1} \frac{2}{2}}{\frac{1}{2} \frac{2}{2}}$$

*+9

: ;)

$$2 \frac{\frac{3}{1} \frac{3}{2} \frac{3}{3}}{\frac{1}{2} \frac{2}{3}}$$

*+(

1.

< = =)

1

*+((

-

dr

3

$E_c(r)$ 1)

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n E_i(r) \frac{P_i r_i}{r} \frac{P_e r_e}{r} E_c(r) dr$$

*+(&

,)

$$u_r \frac{P_i r_i}{r} \frac{P_e r_e}{r} E_c(r) dr$$

+(

3

;

1

)

$$\frac{u_r}{r} \frac{P_i r_i}{r} \frac{P_e r_e}{r} E_c(r) dr$$

*+.

$$E_c(r) \frac{E_c(r)(P_i r_i P_e r_e)}{r} E_c(r) dr$$

*+(/

\$

-

;

3

)

*+(0

>, " ?@ 8" #A B %, CD: \$"% (99/

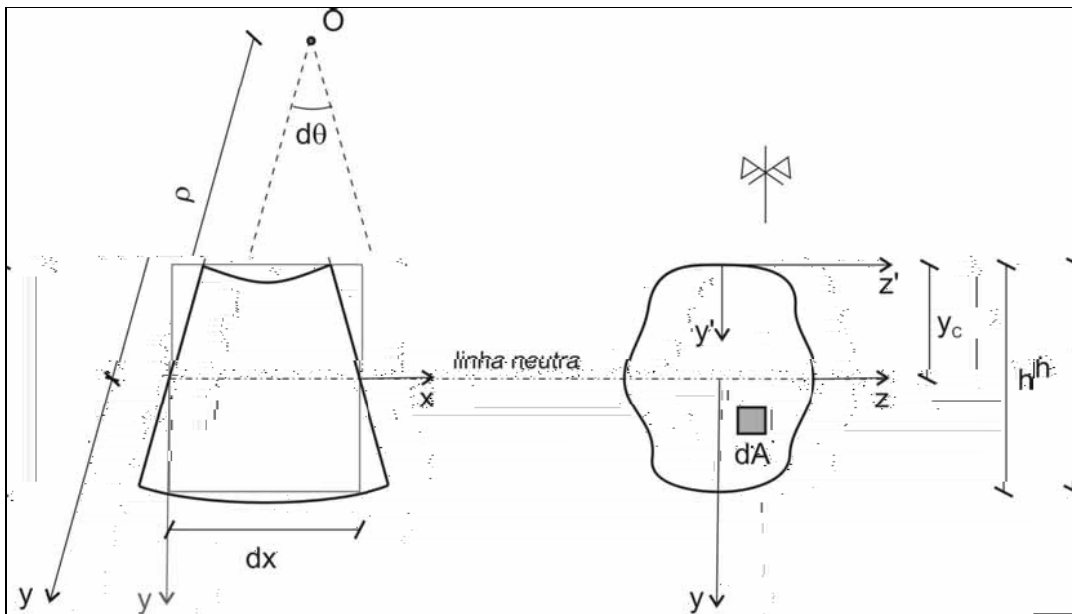
$(r)E_c(r)(T(r) T_0)$ *(1

$(r) T(r)$ 3
- $r T_0 -$

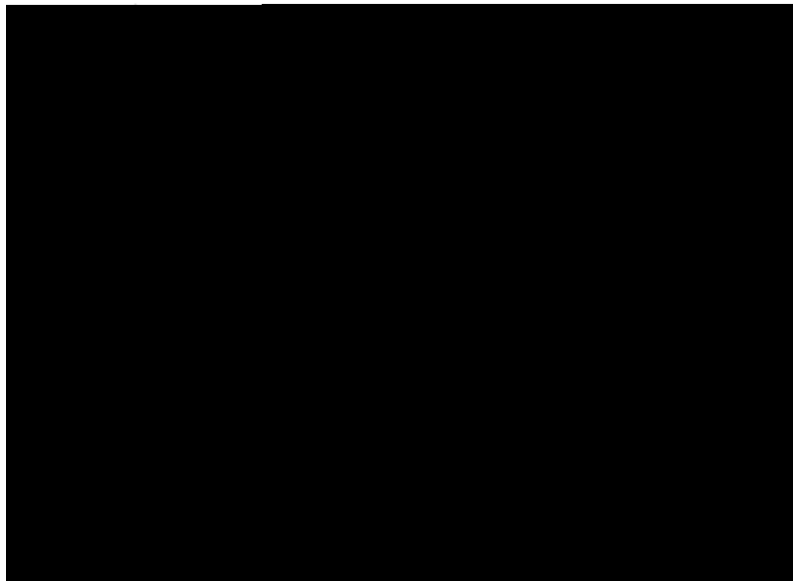
+

!

% 4 3 3 3
l 3 5 6 + *7& +



6 *7& E F +
, 6 + *7* 3 3
3 GCHGID\$" (99' +



6 *7* E < ; > J 3 3 GCHGID\$" (99' +
:)

*(2

$$1 \frac{1}{3} \text{ --- } ^2$$

*(2

7

;

7 ;

3

K

+

,

3

3

6<>

;

-

3-

3

)

$$\text{---} \\ 2$$

*(9

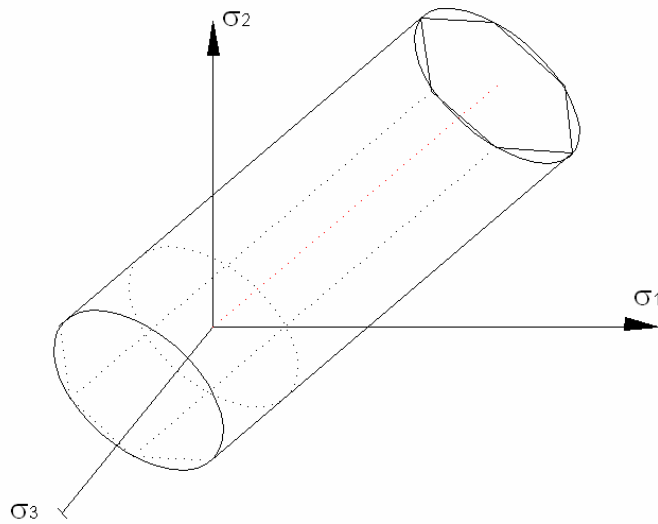
3

3

;

3

"
 # \$ %
 8 - 4 3
 ;
 ; + \$ 3
 ; + , 7
 ; 7
 - ; 3 > +
 % -
 L + 7
 3 6 *7&



6 *7. E % 3 > +
 : - 3 >
 3
 +
 \$ - 3
)

$$M_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{xx})^2 + (\sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_r - \sigma_{rx} - \sigma_x)^2}$$

*+&'

! - " 7 5
 +

/2

D 7 3) +

$$M_{eq} \sqrt{()^2 (r)^2 (x)^2 (r) (x) (r x)}$$
 *+&(

D + *+./)

$$M_{eq} \sqrt{(x)^2 (x) ()^2}$$
 *+&&

& %

+ C 3 = 7

= 3 3 7 -

+ , GF\$% &' '& - 3

H*(< : DF " 76(' (- '2/ G - ; 3 4 , %>\$

$$\frac{1}{1} \frac{0}{0}$$
 +&

- 3 3 - 7 ; 7

- ; ; 3 3 5 M 6

- + % %8CN, &' '* - 7)

<) > - ;

+ \$

! " # \$ % & ' () * + ,

, = , 0

< II) > +

\$ 7 / . . ' () * + ,

, 0 . , 0 - . +

&
() ' * + ,

, ' , 1 (. 2, , - 3) , 00 .

: DF7" 76(' (999 -

; 7 : IDIN &' '& +

%

5 -)

$$\frac{2}{1} \frac{1 -}{1 -} \quad *+&.$$

M K 5 -
3 6) ;

$$1 \ 0431 \frac{\&^2 \ 1 \ 2}{1} \quad *+&/$$

G- +

3)

$$\frac{2}{1} \frac{1 -}{1 -} 5_1$$

*+&

0'

$$5_l \frac{1 \quad \&}{1 \quad -}$$

*+&1

$$\& \frac{1}{\$} + \frac{4}{-}$$

*+&2

$$1 \quad -$$

*+&9

$$\frac{\&}{\$}$$

+'

$$+ \quad -$$

3

0 &

-

0 & -

!! =

+

&

- . /

0 6) 0.

6 ,

, , - , %> \$7H* (< (99(

3 3

=

;)

& 20 ^{1 2}

$$\frac{14l \quad 2 \quad 1 \quad \frac{2}{3}}{1 \quad \frac{2}{3}}$$

+(

$$1 \quad 048 \frac{\&^2}{-} \quad 1 \quad 2$$

+&

L (20Dt)^{1/2}

0(

$$\frac{141}{2} 1 -$$

*+**

%

+.

-

+

&
, O& 1

- -

H*(<

3

H*(< 3-

3

+

%

6CPIQ, >, &''. 3

>)

08 68795

+/

8

6

-

3

)

$$1 \ 046275 \frac{\&^2}{2} \ 04003375 \frac{\&^4}{2 \ 2} \ \&^2 \ 50$$

*+*0

$$04032 \frac{\&^2}{2} \ L^2 / Dt \ 50$$

*+*1

&

M

3

+

, 0

$$6845 \frac{2}{1} \frac{1 \ 0485 -}{1 \ 0485 -}$$

*+*2

&"
2 -

-

3

$$6845 \frac{2}{1} \frac{1}{0}$$

*+*9

)

& ² 50

$$1 \ 046275 \frac{\&^2}{2} \ 04003375 \frac{\&^4}{2^2}$$

*+. '

L_{ef}^2 / Dt 50

$$343 \ 04032 \frac{\&^2}{2}$$

*+. (

& ; 3 +

3

!% 4

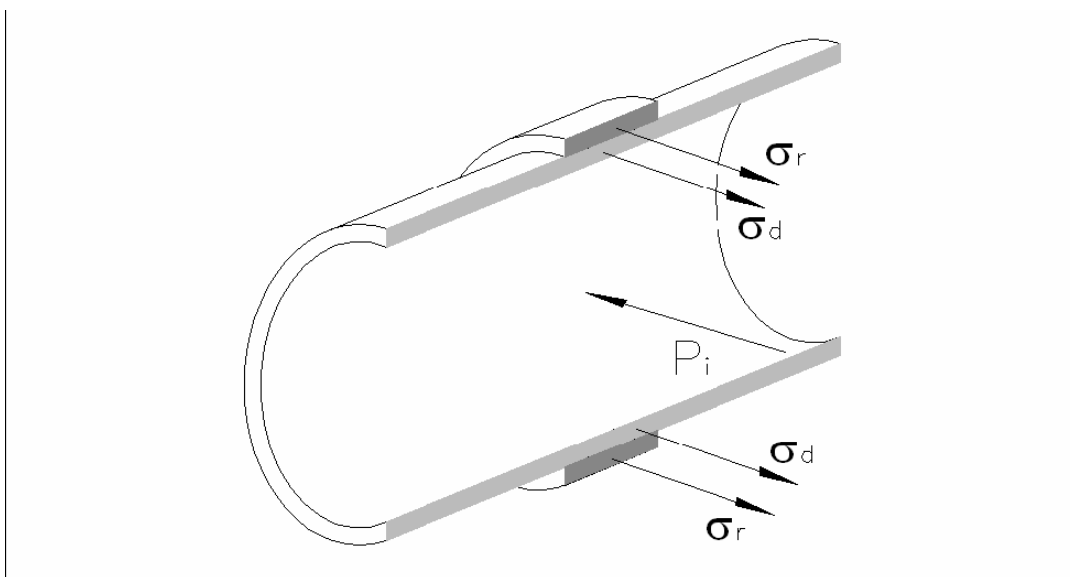
C

;

3 3

7

) 9) & 6 +*7* +



6 *1/1\$

, "> 8" G, # \$ (992 +

0*

8 ;

3

)

+

M

4

-

)

0 0

*+. &

-

-

-

-

+

7

6<>

+*+* *+(/

)

$$\frac{0 \ 0 \ 1 \ 1}{1 \ 0}$$

*+. *

$$r \frac{P_1 r_1 E_c}{r_2} E_c dr$$

*+. .

r1

-

-

-

+

6<>

+*+. & *+. .

)

r2

$$E_c dr$$

$$r_2 \ r_1 \ \frac{r_1}{E_c}$$

*+. /

%

+

4

+*+(*+(* 7)

$$P_1 r_1 \frac{P_0 r_0 E_c dr}{r_1 \ r_2} E_d(r_1 \ r_0) E_c dr$$

*+. 0

0.

+

: + *+. / *+.0 7 5
; 6<>

; o: +

20: 1 $\frac{10: 1 1 0}{0 0 10: 1 2}$

*+.1

7

; +*+* - 7)

10: $\frac{0 0 1 0}{1}$

*+.2

)

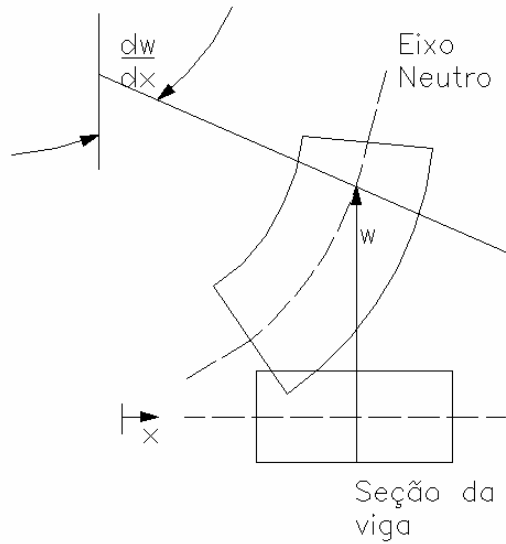
10: $\frac{0 0}{9 1 0 1}$

*+.9

4 Modelo

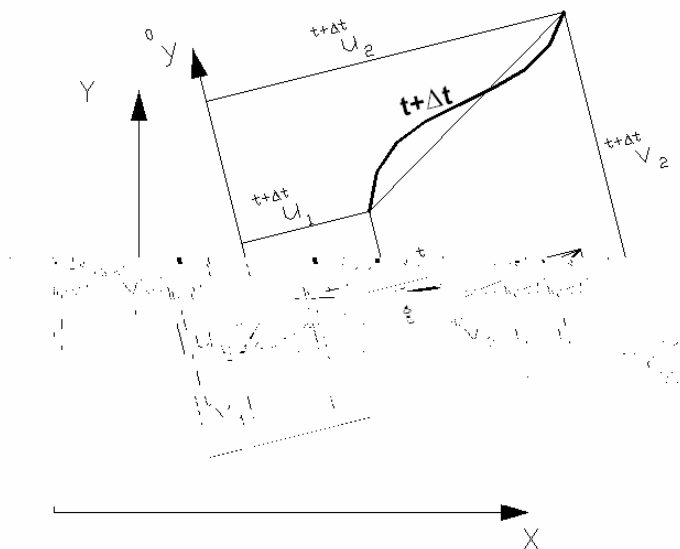
4.1. Fundamentação teórica

- " ()*
- + , + &
-) () (- ,
- + . / 01 2&3



- 1 2 4)*
- 5 *
- (3
- 6 3
- Winkler
-) (7 8 7080
- (+) (0

(0 1 # 0) (



$$\int_V C_{ijrs} e_{rs} \delta e_{ij} dV + \int_V {}^t S_{ij} \delta e_{ij} dV = \int_V {}^t S_{ij} \delta e_{ij} dV$$

$\int_V C_{ijrs} e_{rs} \delta e_{ij} dV$ (Piola-Kirchhoff) $\int_V {}^t S_{ij} \delta e_{ij} dV$ (Green-Lagrange)

$$t \epsilon_x = t \epsilon - y t \phi_z + z t \phi_y$$

$$t \epsilon_x^L = t \epsilon_x^{NL}$$

$$t \phi_y = t \phi_z$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0410783/CA

4.2. Comportamento elástico do material

9>

;)*

;

0

")(*)*

)

)(

)(

(

)(

0

)(

)*

<)

)*

)(

7

8

7080&

,

$${}^t S_{ij} = {}^t C_{ijrs} {}^t e_{rs}$$

10=&

6

)*

*

<

(

)(

,

$$[C^E] = \frac{E(-\nu)}{(+\nu)(-\nu)} \begin{bmatrix} & \frac{\nu}{-v} & \frac{\nu}{-v} \\ \frac{\nu}{-v} & & \frac{\nu}{-v} \\ \frac{\nu}{-v} & \frac{\nu}{-v} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-\nu}{(-\nu)} \\ \frac{-\nu}{(-\nu)} \\ \frac{-\nu}{(-\nu)} \end{bmatrix} \quad 101&$$

; E v (.

?

0

1 2. 13. 92TJTd3.(00)7Tj - 3 8. 58157 010T02 (T0 T()1Tj. 410. 28302 1131 8 T

$$dS_{ij} = C_{ijrs}^E d\varepsilon_{rs}^E = C_{ijrs}^E (d\varepsilon_{rs} - d\varepsilon_{rs}^P)$$

$$d\varepsilon_{rs} = d\varepsilon_{rs}^E + d\varepsilon_{rs}^P$$

0

"

)* <)(
,

• :)(
()(
3

•)* 3

• 7 3

• 7 0

")(
)(
(

788335 0 Td ()Tj 12. 3j 6. 00342 0 Td ()Tj 5. 76328 0 Td ()T

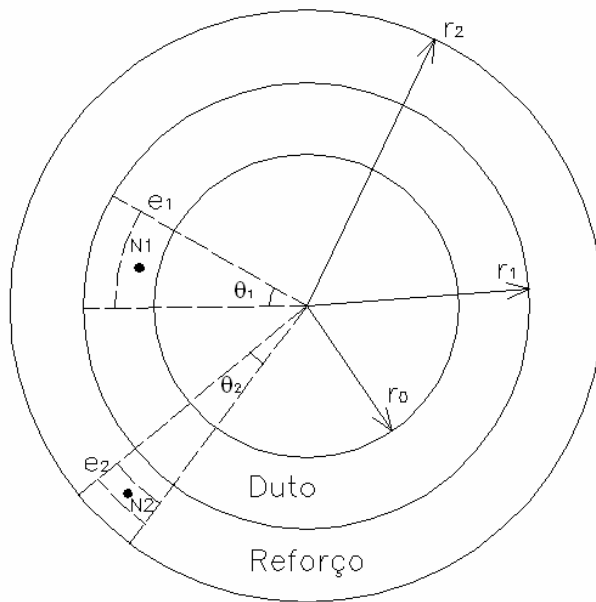
>\$

;) (5
 FG \$\$\$=

$$\begin{Bmatrix} t\varepsilon_\theta \\ t\varepsilon_r \\ t\varepsilon_x \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} -\nu & -\nu \\ -\nu & -\nu \\ -\nu & -\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} tP_{\theta\theta} & tP_{\theta r} & tP_{\theta x} \\ tP_{r\theta} & tP_{rr} & tP_{rx} \\ tP_{x\theta} & tP_{xr} & tP_{xx} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} tC_{\theta x} \\ tC_{rx} \end{Bmatrix} t\varepsilon_x \quad 1029\&$$

4.4. Avaliação incremental das tensões

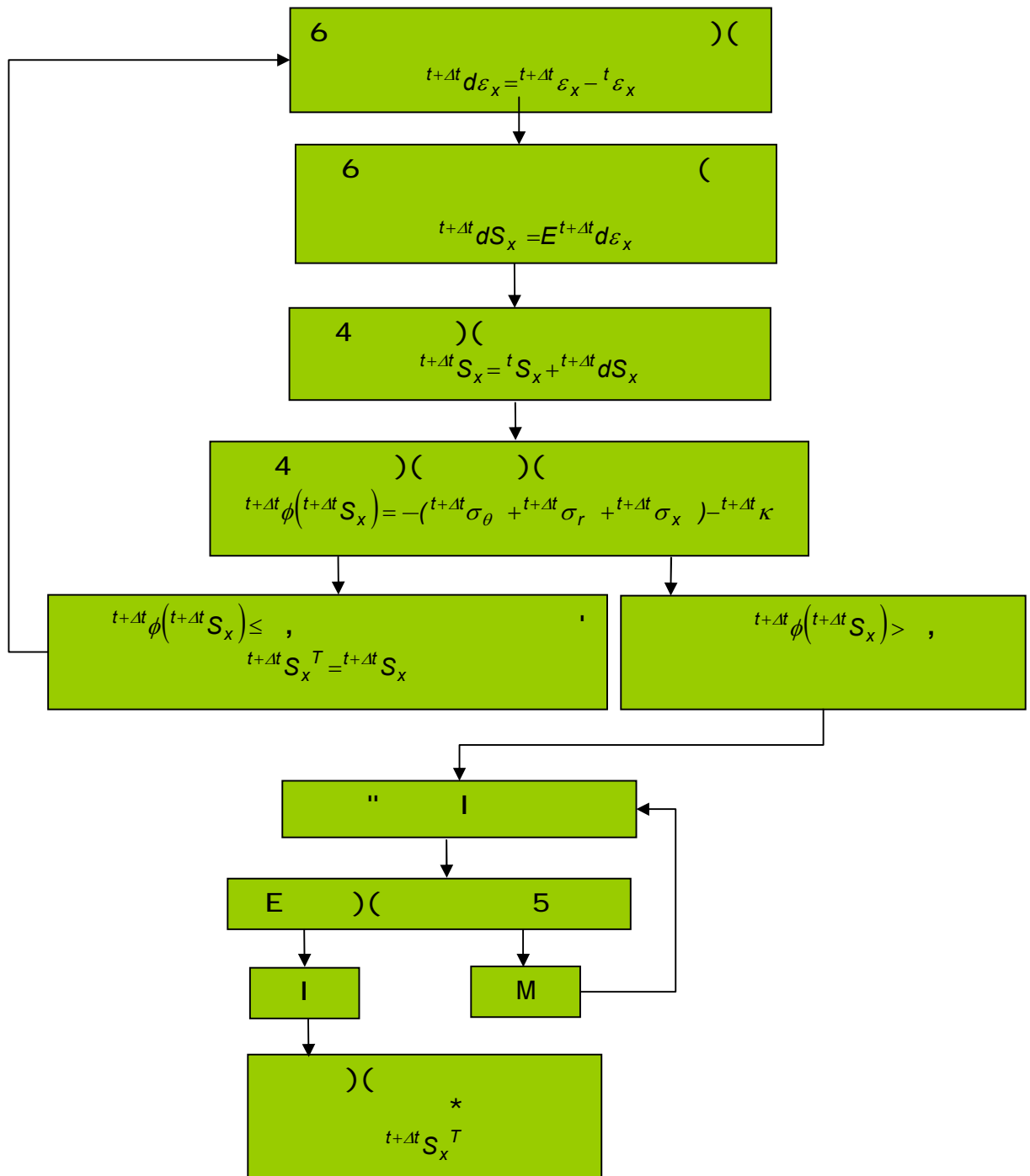
6 *
) (E ! " \$\$\$%&0
) (: 41
) (;) <
 0 1 = ;
) *
 <) (;) (J
) (0



1 = 4 <) () (K)

(; <

0 1 1'



1 1 L ?

(

0

$${}^tK = -\int_A {}^tC^{EP} x d^tA \quad 102B \&$$

$${}^tK = \int_A {}^tC^{EP} x d^tA \quad 102B \&$$

$${}_5 = -\int \quad {}_2 \quad {}_3 \quad 102B \&$$

$${}_6 = \int \quad {}_3 \quad {}_2 \quad 102B \&$$

" ; 0 102B () () (0 1 = 0) ()

") ; ${}^t F_{eq}; {}^t M_{eq}$ & (

$${}^tF_{eq} = \int_A ({}^tS_x + {}^tC_{\theta x} {}^tS_{\theta}) d^tA \quad 102A \&$$

$${}^tM_{eq} = -\int_A ({}^tS_x + {}^tC_{\theta x} {}^tS_{\theta}) x d^tA \quad 102A \&$$

$${}^tM_{eq} = -\int_A ({}^tS_x + {}^tC_{\theta x} {}^tS_{\theta}) x d^tA \quad 102A \&$$

;) (+
: 4 I

$$\int_L ({}^tF_{eq} \delta_t \varepsilon^{NL} + {}^tM_{eq} \delta_t \phi_z^{NL} + {}^tM_{eq} \delta_t \phi_y^{NL}) d^tX \quad P \int_L ({}^tK_{t\varepsilon} L + {}^tK_{\phi_z} L + {}^tK_{\phi_y} L) \delta_t \varepsilon^L$$

$$P ({}^tK_{t\varepsilon} L + {}^tK_{\phi_z} L + {}^tK_{\phi_y} L) \delta_t \phi_z^L \quad P ({}^tK_{t\varepsilon} L + {}^tK_{\phi_z} L + {}^tK_{\phi_y} L) \delta_t \phi_y^L \quad 10\# \&$$

$$P \int_L ({}^tK_{AS} t \Delta_{AS}) \delta_t u d^tX \quad P \int_L ({}^tK_{BS} t \Delta_{BS} + {}^tK_{US} t \Delta_{US}) \delta_t v d^tX \quad P$$

$$P \int_L ({}^tK_{LLS} t \Delta_{LLS} + {}^tK_{RLS} t \Delta_{RLS}) \delta_t w d^tX \quad Q \delta^{t+\Delta t} W_{ext} P$$

$$-\int_L ({}^tF_{eq} \delta_t \varepsilon^L + {}^tM_{eq} \delta_t \phi_z^L + {}^tM_{eq} \delta_t \phi_y^L) d^tX \quad -\int_L ({}^tF_{AS}) \delta_t u d^tX \quad P$$

$$-\int_L ({}^tF_{BS} + {}^tF_{US}) \delta_t v d^tX \quad -\int_L ({}^tF_{LLS} + {}^tF_{RLS}) \delta_t w d^tX$$

") *) (+
) * @ (

$$h (t_{\xi}) = -\frac{t_{\xi}}{\xi} + \frac{t_{\xi}}{\xi} \quad 10\#2 \&$$

$$h (t_{\xi}) = h (t_{\xi}) - t_{\xi} - \frac{t_{\xi}}{\xi} - \frac{t_{\xi}}{\xi} + \frac{t_{\xi}}{\xi} \quad 10\#2 \&$$

[
]]

]

>>

>B

$$\eta = \begin{cases} ,se & tV < \\ ,se & tV > \end{cases} \quad 10=2 \ \&$$

$$\beta = \begin{cases} ,se & tW < \\ ,se & tW > \end{cases} \quad 10=2 \ \&$$

$\{tU_e\}$

$$\left\{ \tilde{tU}_e \right\}$$

$$\{tU_e\} = [{}^tR_T] \left\{ \tilde{tU}_e \right\} \quad 10=#\&$$

$$[{}^tR_T] \quad < \quad)(\quad)(\quad .$$

$$" \quad < \quad (\quad)(\quad <$$

$$[{}^tD^p] = \begin{bmatrix} {}^tK & {}^tK & {}^tK \\ {}^tK & {}^tK & {}^tK \\ {}^tK & {}^tK & {}^tK \end{bmatrix} \quad 10==\&$$

; ${}^tK, {}^tK, {}^tK, {}^tK, {}^tK, {}^tK$ (; 0 102B)

$$R \quad - \quad < \quad (\quad)(\quad .$$

$$[{}^tD^s] = \begin{bmatrix} {}^tK_{AS} & & & \\ & {}^tK_{BS} & & \\ & & {}^tK_{US} & \\ & & & {}^tK_{RLS} \\ & & {}^tK_{LLS} & \end{bmatrix} \quad 10=1\&$$

" <) (.

$$[{}^tF] = \begin{bmatrix} {}^tF_{eq} \\ & {}^tF_{eq} \\ & & {}^tF_{eq} \end{bmatrix} \quad 10=% \ \&$$

$$[{}^tM] = \begin{bmatrix} {}^tM_{eq} \\ & {}^tM_{eq} \\ & & {}^tM_{eq} \end{bmatrix} \quad 10=% \ \&$$

>A

$${}^tM = \begin{bmatrix} {}^tM_{eq} & & \\ & {}^tM_{eq} & \\ & & {}^tM_{eq} \end{bmatrix}$$

10=% &

? ;) (; ,
< K (' ,

$${}^tK^G \{ {}^tU^G \} = \{ {}^tR^G \} - \{ {}^tF^G \}$$

10=9&

$$; \{ {}^tR^G \}) \{ {}^tF^G \})$$

0

5

Exemplos numéricos

Neste trabalho, foram realizados 5 (cinco) estudos de caso, com intuito de validar o modelo implementado na presente pesquisa na análise mecânica de dutos e avaliar os efeitos das solicitações comumente presentes numa linha de duto - interação solo-estrutura, pressão interna e variação térmica – sob três classes distintas de materiais, a saber: os materiais homogêneos, os materiais compósitos convencionais e os materiais com gradação funcional.

Para os exemplos onde é contemplada a não-linearidade, física e/ou geométrica, emprega-se o método de Newton-Raphson modificado. Tais soluções são obtidas por meio de um processo iterativo e incremental, convergindo ao equilíbrio à medida que se avança em cada passo.

No primeiro exemplo, retirado da dissertação de mestrado de SOUZA (2005), realizam-se duas análises a partir da metodologia desenvolvida, nas quais o duto é considerado ora com comportamento elástico, ora elasto-plástico.

Já o segundo estudo de caso trata dos efeitos da pressão interna, da variação da temperatura e de sobrecarga externa sob uma linha de dutos (SOUZA, 2005).

A terceira análise numérica consiste do emprego de três classes de material compósito constituído de matriz polimérica e reforço sob a forma de fibras como reparo de um trecho de duto danificado submetido à pressão interna e carregamento do solo (TOUTANJI, 2001).

As respostas na aplicação de camada reparadora de um duto sob corrosão externa (CÔRTEZ, 2001), para duas categorias distintas de material compósito – convencional e *FGM* – estão presentes no quarto exemplo.

O último estudo, em que se reveste com camada de reforço um duto submetido à pressão interna, consiste do exame dos efeitos da funcionalidade graduada aplicada ao material do referido reforço, com a conseqüente comparação dos resultados para diversos materiais utilizados.

5.1 Exemplo 1

Este exemplo analisa o comportamento do duto composto de material homogêneo elástico e alternativamente elasto-plástico.

O modelo de análise consiste de um duto biapoiado com momentos aplicados em torno do eixo x_3 sobre os apoios (Fig. 5-1).

Figura 5-1 - Modelo do duto (SOUZA, 2005).

A Tabela 5-1 apresenta as características geométricas do referido duto.

Tabela 5-1 – Propriedades da seção do duto

<i>Propriedades geométricas do duto</i>	
Diâmetro interno (m)	0.3125
Diâmetro interno (m)	$\hat{\alpha}$

Tabela 5-2 – Propriedades do material do duto

Propriedades materiais do duto	
Tensão de escoamento (MPa)	420
Módulo de elasticidade (GPa)	205
Coefficiente de Poisson	0.25
Módulo tangente (GPa)	75
Módulo transversal (GPa)	82

A partir da equação elástica de viga biapoiada com momento concentrado (M_z) na suas extremidades, obtêm-se as seguintes expressões analíticas da deflexão vertical (v), rotação em torno do eixo z (θ_z) e tensão axial (σ_x):

$$v(x) = -\frac{M_z}{EI} \left(-\frac{x^3}{3L} + \frac{x^2}{2} - \frac{Lx}{6} \right) \quad 0 \leq x \leq L \quad (5.1a)$$

$$\theta_z(x) = -\frac{M_z}{EI} \left(-\frac{x^2}{L} + x - \frac{L}{6} \right) \quad 0 \leq x \leq L \quad (5.1b)$$

$$\sigma_x(x) = \frac{M_z}{I} \left(-\frac{2x}{L} + 1 \right) y \quad 0 \leq x \leq L, r_i \leq y \leq r_e \quad (5.1c)$$

A tensão axial máxima no comportamento elástico ($\sigma_{m\acute{a}x}$) do duto é admitida igual à tensão de escoamento do material (σ_Y), no que resulta na seguinte equação para o momento de plastificação (M_p):

$$M_p = \frac{\sigma_Y I}{r_e} \quad (5.2)$$

No presente caso, o referido momento plástico assume o valor de 205.000 N.m. Desta forma, com intuito de avaliar as deformações axiais elásticas, adota-se o momento aplicado às extremidades de intensidade igual a 100.000 N.m, em 20 incrementos de carga.

Na Tabela 5-3, estão presentes os resultados para o deslocamento vertical (v) e rotações (θ_z), obtidos analítica e numericamente; esta última análise, realizada através dos programas REDUCT (REpair DUCT), elaborado no contexto da presente pesquisa, com a consideração ou não dos efeitos da não-linearidade geométrica. A seção transversal é formada inicialmente por 32 elementos (Fig. 5-2).

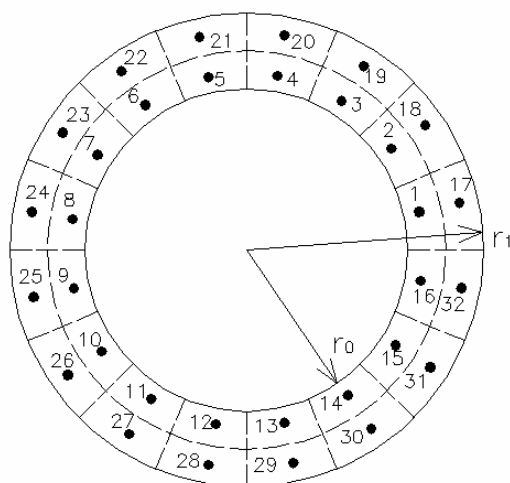


Figura 5-2 – Discretização da seção transversal do duto em 32 segmentos de área.

Tabela 5-3 – Valores dos deslocamentos e rotações nodais para o duto submetido a um momento aplicado de 100.000 N.m nas extremidades.

Nó (j)	REDUCT				ANALÍTICO		DIFERENÇA PERCENTUAL (%)			
	Linear elástico		Não-linear elástico				v^j		θ^j	
	v^j (m)	θ^j (rad)	v^j (m)	θ^j (rad)	LE	NLE	LE	NLE		
1	0.000	-0.104	0.000	-0.061	0.000	-0.102	0.00	0.00	1.96	40.20
2	-0.856	-0.036	-0.356	-0.032	0.839	0.035	2.02	57.56	2.86	8.57
3	-0.978	0.013	-0.252	-0.013	0.959	-0.013	1.98	73.72	0.00	0.00
4	-0.611	0.042	-0.112	-0.010	0.599	-0.042	2.00	81.30	0.00	76.19
5	0.000	0.052	0.000	0.009	0.000	-0.051	0.00	0.00	1.96	82.35
6	0.611	0.042	0.112	0.010	-0.599	-0.042	2.00	81.30	0.00	76.19
7	0.978	0.013	0.252	-0.013	-0.959	-0.013	1.98	73.72	0.00	0.00
8	0.856	-0.036	0.356	-0.104	0.839	0.036	2.02	57.56	2.86	8.57
9	0.000	-0.104	0.000	-0.061	0.000	0.103	0.00	0.00	1.96	40.20

A Tabela 5.4 mostra os valores de momento fletor (M), na seção correspondente ao deslocamento vertical máximo, ou seja, a um quarto do vão ($x_2 = 25$ m), segundo a análise teórica, e a rotina REDUCT. Nas simulações numéricas, a fim de avaliar a influência do refinamento da discretização da seção nos resultados, adotou-se a discretização longitudinal em quatro elementos de mesmo comprimento

e uma variação do número de elementos na seção transversal, de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 5-4 – Momento fletor na seção de deslocamento vertical máximo ($x_2 = 25$ m)

	M_{eq2} , em Nm
ANALÍTICO	50,000
REDUCT (4 SEGMENTOS TRANSVERSAIS)	27,120
REDUCT (16 SEGMENTOS TRANSVERSAIS)	37,710
REDUCT (32 SEGMENTOS TRANSVERSAIS)	44,920
REDUCT (128 SEGMENTOS TRANSVERSAIS)	49,970

Na Fig. 5-3 são apresentados os diagramas de deslocamento vertical para o duto submetido à carga de momento (M_z) nos apoios igual a 100.000 N.m, considerando a linearidade geométrica (SNLG) e não (CNLG).

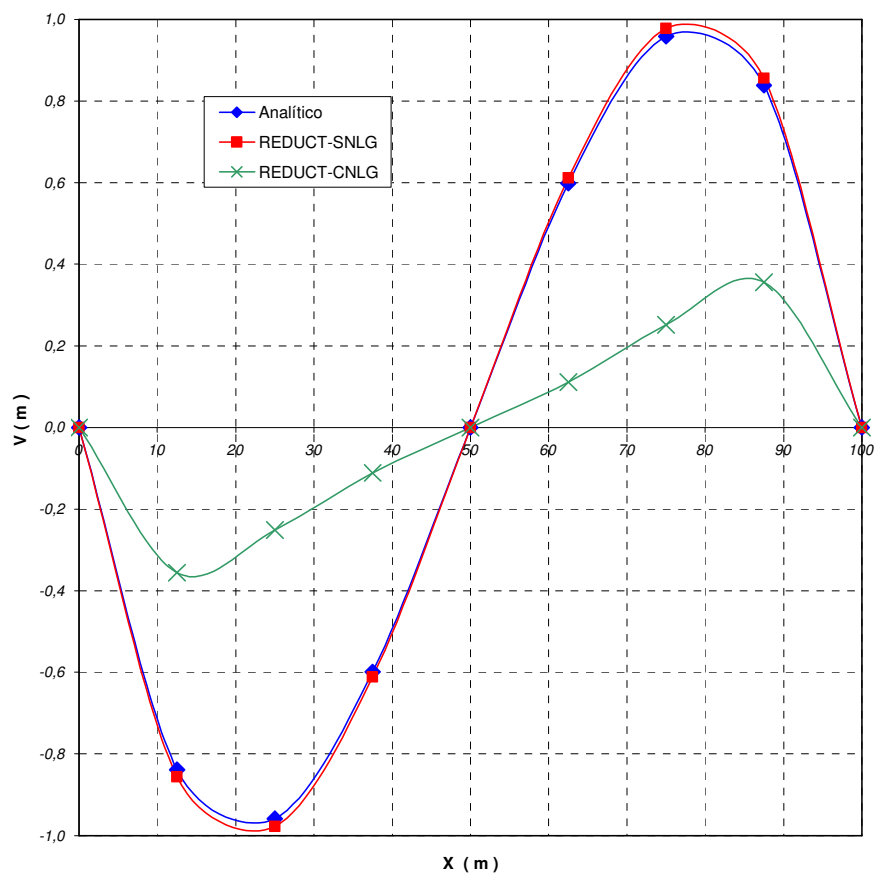


Figura 5-3 – Diagrama de deslocamento vertical ao longo do duto ($M_z = 100.000$ N.m).

Na situação a seguir, aplica-se um momento às extremidades de valor 250.000 N.m. , resultando assim em deformações axiais plásticas na estrutura.

O material do duto apresenta comportamento elastoplástico com endurecimento isotrópico linear, ou seja, o diagrama de tensão-deformação do material é bi-linear, constituído assim de uma zona linear elástica e outra zona linear plástica, esta última de inclinação E_T .

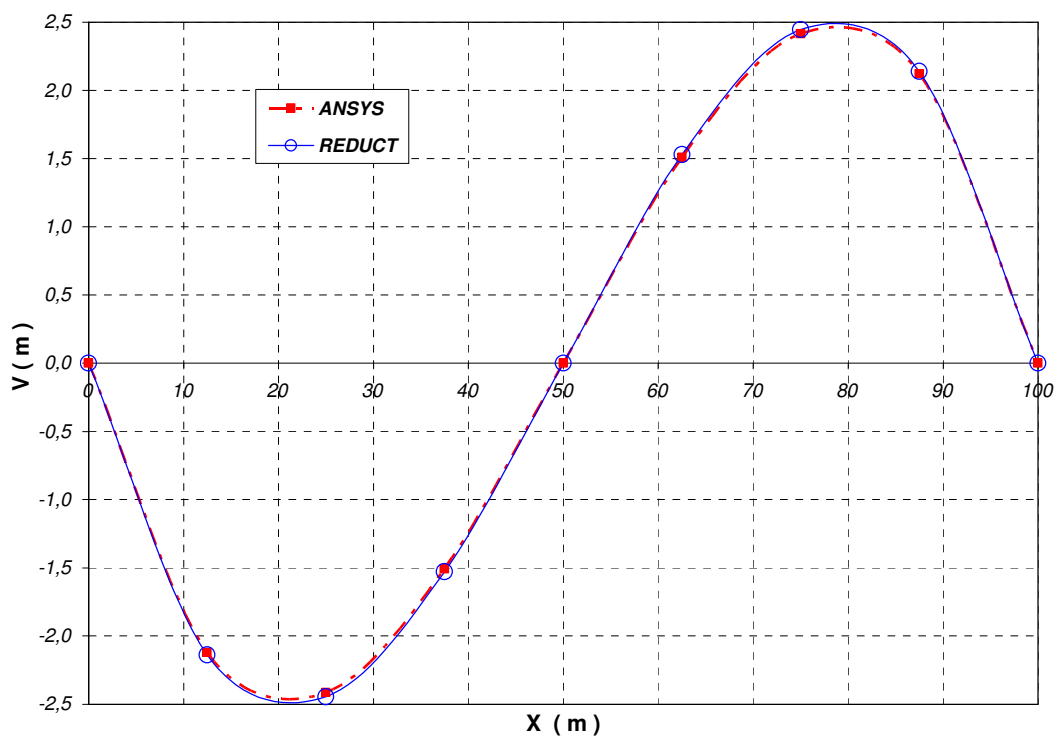
A tolerância de convergência adotada na solução da análise não-linear é igual a 10^{-4} , e o carregamento atuante total foi dividido em 20 incrementos de carga. As forças internas na seção transversal foram obtidas com a divisão da mesma em 40 elementos de área.

Tal como na análise elástica, são examinados numericamente as rotações e os deslocamentos ao longo do referido duto para 32 elementos na seção transversal (Tabela 5.5); e o momento fletor (M) na seção referente ao deslocamento vertical máximo (Tabela 5-6). No caso das soluções numéricas, são empregados o *software* comercial ANSYS – elemento 2-D Plastic Beam (BEAM23) - e a rotina REDUCT.

Tabela 5-5 – Valores dos deslocamentos e rotações nodais para o duto submetido a luções numé

Tabela 5-6 – Momento fletor na seção de deslocamento vertical máximo ($x_2 = 25$ m)

	M_{eq2} , em Nm
ANALÍTICO	125,000
REDUCT (4 SEGMENTOS TRANSVERSAIS)	111,240
REDUCT (16 SEGMENTOS TRANSVERSAIS)	119,750
REDUCT (32 SEGMENTOS TRANSVERSAIS)	122,160
REDUCT (128 SEGMENTOS TRANSVERSAIS)	124,990

Figura 5-4 – Diagrama da deformação vertical ao longo do duto ($M_z = 250.000$ N.m).

A Fig. 5-5 ilustra os resultados obtidos pelo REDUCT quanto da variação do momento fletor máximo na viga ($x_2 = 25$ m) com o número de elementos axiais arbitrados na discretização da referida estrutura, tanto para o comportamento elástico, como para o regime elasto-plástico.

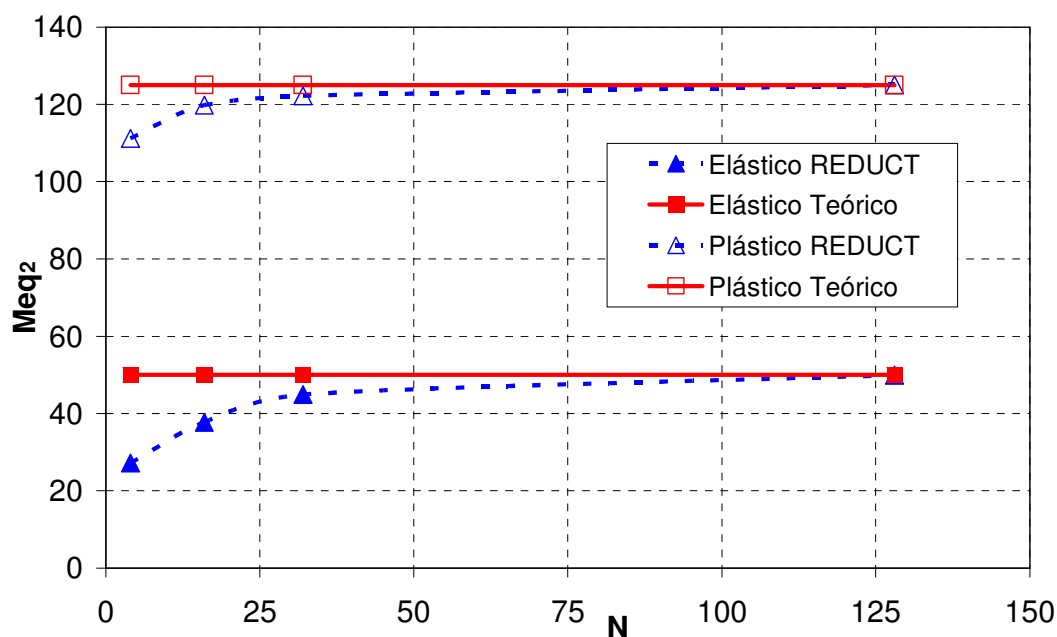


Figura 5-5 – Gráfico Momento fletor máximo X N° de elementos axiais.

Na análise mecânica da viga sob comportamento elástico, o resultado numérico, desconsiderando a não-linearidade geométrica e obtido a partir do programa REDUCT, aproximou-se da solução teórica. Ao contemplar os efeitos da não-linearidade geométrica, observou-se uma redução dos deslocamentos verticais ao longo da linha do duto (Fig. 5-3), devido à influência da geometria do duto em grandezas relevantes, tais como a matriz de rigidez do elemento. Para o regime plástico, é verificada a convergência entre os resultados numéricos fornecidos por duas rotinas computacionais: REDUCT, desenvolvida pela presente pesquisa, e o programa comercial ANSYS 8.0 (Fig 5-4). Em ambas as análises, constatou-se a tendência da solução numérica de se aproximar dos resultados analíticos com o refinamento da malha em questão, conforme pode ser concluído do caráter assintótico das curvas presentes na Fig. 5-5. Neste caso, a discretização da seção transversal entre 64 e 128 segmentos na análise numérica reflete uma resposta satisfatória do programa

5.2 Exemplo 2

Este exemplo analisa o comportamento de uma linha de duto enterrado numa encosta, submetida a carregamentos externos, à pressão interna e a diferença de temperatura nas paredes do mesmo (SOUZA, 2005), conforme ilustra a Fig. 5-6.

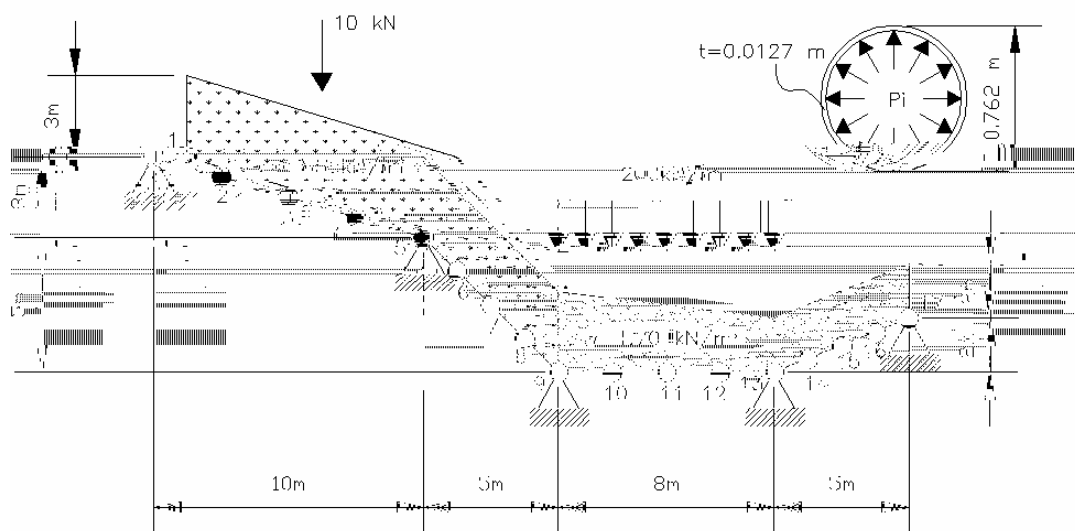


Figura 5-6 – Perfil longitudinal do duto sob carregamento externo, pressão interna e variação de temperatura (SOUZA, 2005).

As propriedades geométricas do duto estão presentes na Tabela 5-7, e as propriedades do material do duto são mostradas na Tabela 5-8.

Tabela 5-7 – Propriedades da seção do duto

<i>Propriedades geométricas do duto</i>	
Diâmetro interno (m)	0.7366
Diâmetro interno (m)	

Tabela 5-8 – Propriedades do material do duto

Propriedades materiais do duto	
Tensão de escoamento (MPa)	420
Módulo de elasticidade (GPa)	205.00
Coefficiente de Poisson	0.25
Módulo tangente (MPa)	75.00
Módulo transversal (MPa)	82.00

Na Tabela 5-9, são apresentados os valores dos carregamentos externos devido à pressão do solo e sobrecarga, e à diferença de temperatura em cada tramo ao longo da linha de duto. A pressão interna tem valor igual a 12 MPa.

Tabela 5-9 – Carregamentos externos sob o duto

Tramo	Pressão do solo na direção x_2 ($\gamma = 1.85 \text{ kN/m}^3$) (N/m)	Pressão do solo na direção x_2 ($\gamma = 1.70 \text{ kN/m}^3$) (N/m)	Carga distribuída na direção x_1 (N/m)	Sobrecarga na direção x_2 (N/m)	ΔT (°C)
1	-4229.1	-	-	-	20
2	-4229.1	-	-	-	20
3	-	-3886.2 a -2590.8	1000	-20000	25
4	-	-2590.8	-	-	30

Os valores das constantes de molas do solo ao longo da linha de duto são apresentados na Tabela 5-10, de acordo com SOUZA (2005).

Tabela 5-10 – Constantes da mola do solo (SOUZA, 2005)

Tramo	K_{AS} (N/m)	$K_{BS}=K_{US}$ (N/m)
1	0	$1000 \frac{EI}{L^4}$
2	0	$700 \frac{EI}{L^4}$
3	0	$500 \frac{EI}{L^4}$
4	0	$500 \frac{EI}{L^4}$

A Tabela 5-11 exibe os valores dos deslocamentos transversais e longitudinais para análise linear realizada através dos programas *ANSYS* e *REDUCT*, sem considerar os efeitos da interação solo-duto. No programa *ANSYS 8.0*, o elemento utilizado foi a viga tridimensional BEAM 44 (3-D Elastic Tapered Unsymmetric Beam), conforme SOUZA (2005). O duto foi discretizado em 8 elementos axiais, em ambas as análises, tendo 8 elementos na seção transversal, para o caso do *REDUCT*.

Tabela 5-11 – Valores dos deslocamentos nas direções axial (x_1) e transversal vertical (x_2) obtidos da análise sem mola do solo.

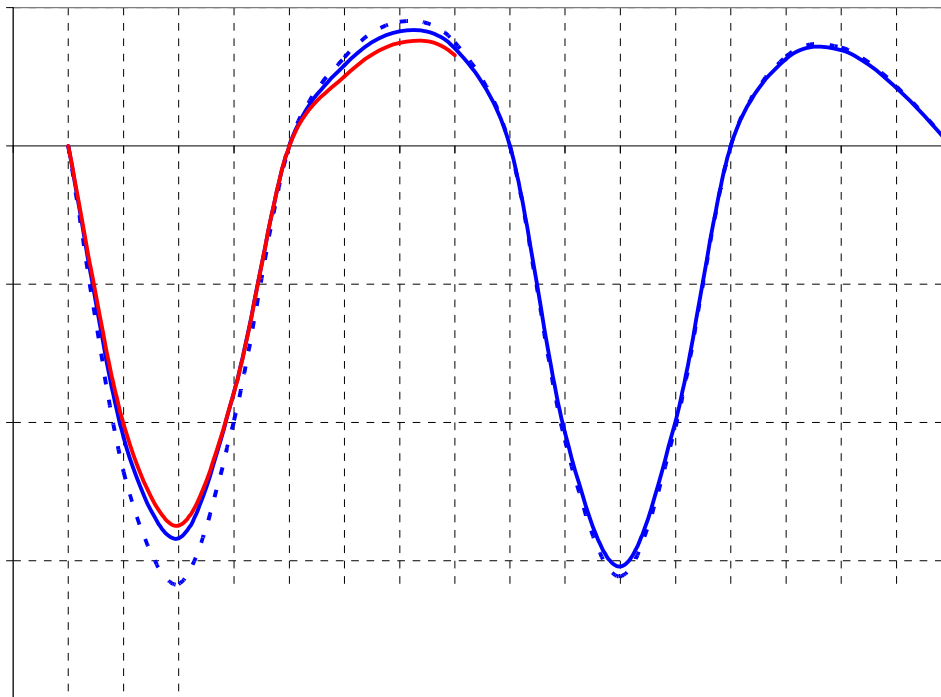
Nó (j)	<i>ANSYS</i>		<i>REDUCT</i>		<i>Diferença Percentual (%)</i>	
	U^j (mm)	V^j (mm)	U^j (mm)	V^j (mm)	U^j	V^j
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	-0.440	-0.011	-0.360	-0.012	0.378	0.083
3	-0.670	-0.015	-0.490	-0.016	0.367	0.063
4	-0.630	-0.980	-0.330	-0.990	0.909	0.010
5	-0.450	0.000	-0.040	0.000	0.940	0.000
6	0.040	-0.260	0.260	-0.320	0.846	0.188
7	0.390	-0.390	0.360	-0.450	0.077	0.133
8	0.570	-0.340	0.260	-0.370	0.344	0.081
9	-0.460	0.000	-0.130	0.000	0.717	0.000
10	-0.370	-0.820	-0.110	-0.011	0.702	0.986
11	-0.270	-0.012	-0.100	-0.016	0.630	0.250
12	-0.180	-0.820	-0.080	-1.02	0.555	0.180
13	-0.090	0.000	-0.060	0.000	0.333	0.000
14	-0.040	0.260	-0.180	0.326	0.778	0.202
15	-0.070	0.280	-0.170	0.360	0.588	0.222
16	-0.050	0.170	-0.100	0.220	0.500	0.227
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

A influência das molas do solo sobre os deslocamentos transversais e longitudinais, segundo análise dos programas *ANSYS* e *REDUCT*, estão apresentadas na Tabela 5-12.

Tabela 5-12 – Valores dos deslocamentos nas direções radial (x_1) e transversal vertical (x_2) obtidos da análise com mola do solo.

Nó (i)	<i>ANSYS</i>		<i>ANSYS</i>		<i>Diferença</i>
	U^i (mm)	V^i (mm)	U^i (mm)	V^i (mm)	

A Fig 5-7 representa o gráfico dos deslocamentos verticais (V) ao longo do duto, em duas situações distintas: considerando os efeitos da interação solo-estrutura e desprezando sua influência na referida análise.



5.3

Exemplo 3

Este estudo de caso ilustra a aplicação e avaliação do referido modelo, em relação aos resultados obtidos analiticamente para um duto enterrado, considerando três situações distintas: sem defeito, danificado e revestido de uma camada de reforço em material compósito (Fig. 5-8). Em ambas as análises, as solicitações consideradas são a pressão de operação do duto e o carregamento devido ao peso próprio do solo (TOUTANJI & DEMPSEY, 2001).

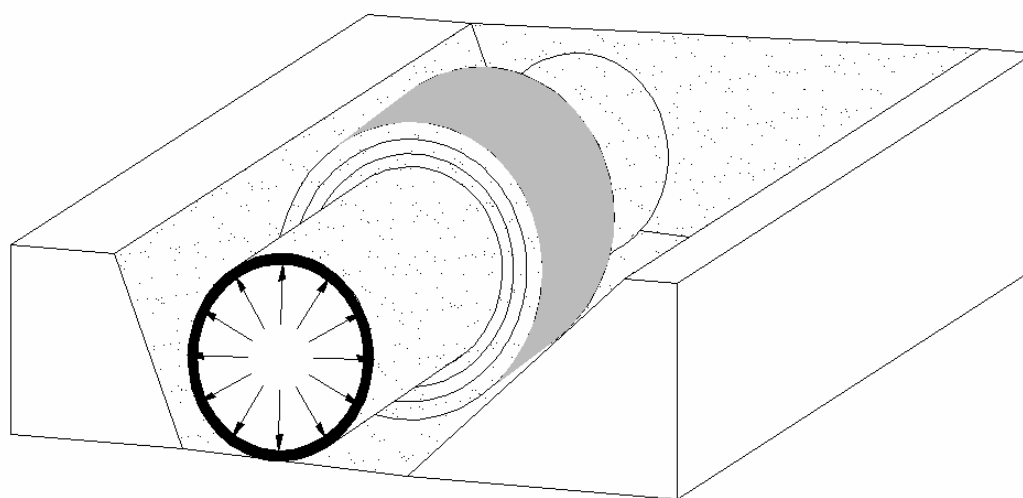


Figura 5-8 – Linha de duto enterrado, submetida à pressão interna (DEMPSEY, 2001).

A Tabela 5-13 apresenta as propriedades relativas à geometria e ao material do duto.

Tabela 5-13 – Propriedades geométricas e materiais do duto e solicitações.

Diâmetro externo (mm)	456.00
Espessura nominal (mm)	5.00
Espessura residual (mm)	2.00
Tensão de escoamento (MPa)	480.0
Tensão última (MPa)	692.0
Tensão de ruptura (MPa)	300.0
Módulo de elasticidade (GPa)	200.0
Coefficiente de Poisson	0.28

A Tabela 5-14 apresenta as propriedades mecânicas verificadas por TOUTANJI & DEMPSEY (2001) para três classes de materiais compósitos com matriz polimérica e reforço: em fibras de vidro, em fibras de aramida e em fibras de carbono.

Tabela 5-14 – Propriedades dos materiais do reparo.

Fibra	Espessura (mm)	Tensão última (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Vidro	0.118	1500	74
Aramida	0.193	2100	120
Carbono	0.165	300	400

De acordo com TOUTANJI & DEMPSEY (2001), em um duto de raio interno r_0 e espessura t_d , constituído de um material com módulo de elasticidade E_d , as tensões circunferenciais devidas à pressão interna P_0 (σ_{pi}) e ao carregamento externo do solo (σ_s) são expressas respectivamente por:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_0 r_0}{t_d} \quad (5.3a)$$

$$\sigma_s = \frac{6k_m C_d \gamma B_d E_d t_d r_0}{E_d t_d^3 + 24k_d P_0 r_0^3} \quad (5.3b)$$

onde k_m é o coeficiente do momento fletor, C_d é o coeficiente do empuxo de terra, γ é o peso próprio unitário do solo, B_d é a largura da vala de topo do duto, e k_d é o coeficiente de deflexão. Os valores adotados para os referidos coeficientes estão apresentados na Tabela 5-15.

Tabela 5-15 – Propriedades mecânicas na linha do duto.

Coeficiente do momento fletor	0.235
Coeficiente do empuxo de terra	1.32
Peso unitário do solo (N/mm³/m)	18.85 x 10 ⁻⁶
Largura da vala no topo (mm)	762
Coeficiente de deflexão	0.108

Para o caso de dutos danificados, com profundidade do dano d , tais tensões são dadas por:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_0 r_0}{(t_d - d)} \quad (5.4a)$$

$$\sigma_s = \frac{6k_m C_d \gamma B_d E (t_d - d) r_0}{E_d (t_d - d)^3 + 24k_d P_0 r_0^3} \quad (5.4b)$$

Com aplicação de uma camada de material compósito de resina polimérica com reforço em fibra de espessura t_r sobre o duto com avaria, chegam-se às seguintes equações relativas às tensões circunferenciais devidas à pressão interna e ao carregamento do solo:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_0 r_0}{t_t} \quad (5.5a)$$

$$\sigma_s = \frac{6k_m C_d \gamma B_d E t_r r_0}{E_d t_t^3 + 24k_d P_0 r_0^3} \quad (5.5b)$$

no qual:

$$t_t = (t_d - d) \left[1 + \frac{E_r t_r}{E_d (t_d - d)} \right] \quad (5.5c)$$

Para efeitos de consideração do *REDUCT*, adota-se a discretização do conjunto duto-reforço em 32 segmentos na seção transversal e 3 elementos axiais.

Assim, a Fig. 5-9 descreve o comportamento mecânico do duto, representando a variação da tensão circunferencial total da estrutura para os valores possíveis de pressão interna.

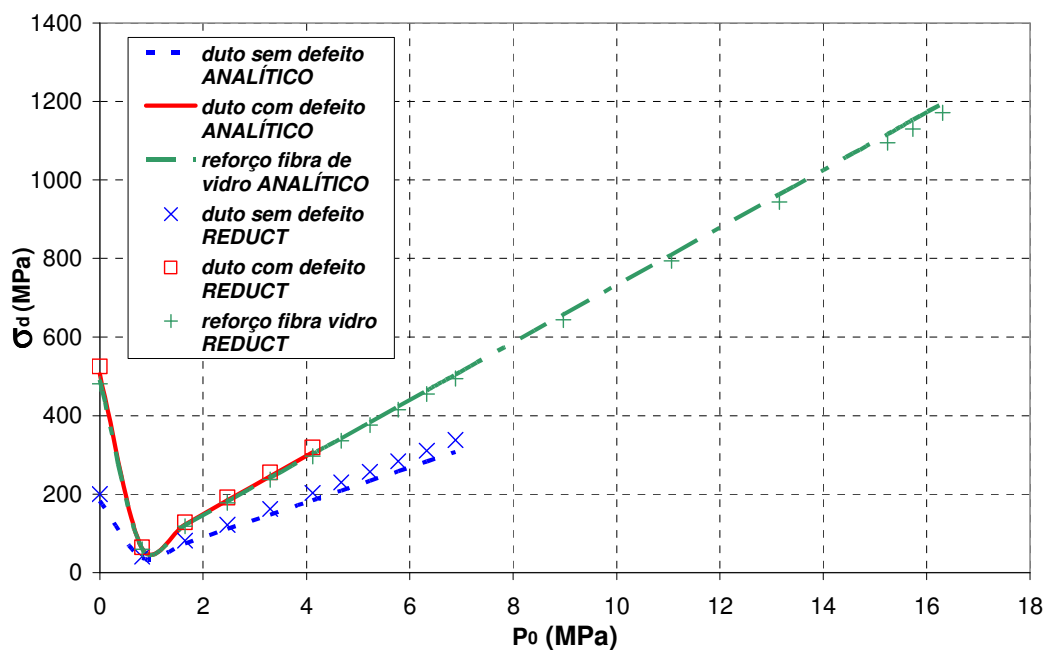


Figura 5-9 – Gráfico Tensão circunferencial total máxima no duto (σ_d) X Pressão interna admissível ao duto (P_0).

Nota-se a convergência dos resultados numéricos para a tensão circunferencial total em todas as etapas: duto sem defeito; duto com defeito; duto reforçado; tendo inclusive, para tanto, a influência da pressão interna do duto com relação à resposta analítica, apesar do arbitramento do tipo de restrição nos apoios do duto – neste caso, optou-se por considerá-lo uma viga biapoiada - pela ausência de tal informação, necessária à entrada de dados do REDUCT, na fonte deste exemplo.

5.4 Exemplo 4

Seja um trecho de duto corroído submetido à pressão interna (Fig. 5-10), a ser analisado com emprego da metodologia desenvolvida por esta pesquisa, para efeitos de validação.

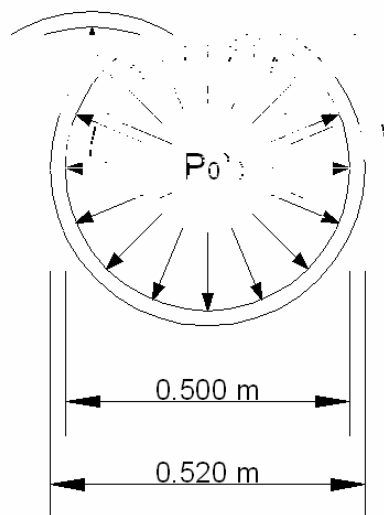


Figura 5-10 – Seção do duto submetido à pressão interna e à variação térmica.

Os dados referentes ao carregamento, à geometria e às propriedades do material do duto estão indicados na Tabela 5-16.

Tabela 5-16 – Propriedades geométricas e materiais do duto – API 5L-X70.

Diâmetro externo (em mm)	520.00
Espessura nominal (em mm)	10.00
Espessura residual (em mm)	9.000
Pressão interna (em MPa)	3.0
Tensão de escoamento (em MPa)	480.0
Tensão última (em MPa)	892.0
Módulo de elasticidade (em GPa)	207.0
Coefficiente de Poisson	0.28

A Tabela 5-17 apresenta as propriedades dos materiais componentes de um material compósito convencional em fibra de vidro com resina polimérica (CÔRTEZ, 2001).

Tabela 5-17 – Propriedades dos materiais do reparo.

Coefficiente de Poisson da Fibra	0,25
Coefficiente de Poisson da Matriz	0,37
Módulo de Elasticidade da Fibra (GPa)	74
Módulo de Elasticidade da Matriz (GPa)	3,0

O projeto se dá considerando o mesmo como um tubo de paredes finas. Para

a

$$r'_{2\text{mín}} = r_1 + \frac{P'_{1\text{mín}} r_1 E_d}{E_r \sigma'_p} \quad (5.6c)$$

$$r'_{2\text{máx}} = r_1 + \frac{P'_{1\text{máx}} r_1 E_d}{E_r \sigma'_p} \quad (5.6d)$$

De maneira análoga, para o caso do FGM em *Ti-TiB*:

$$P''_{1\text{mín}} = \frac{P_0 r_0 - \sigma''_p (r_1 - r_0)}{r_1} \quad (5.7a)$$

$$P''_{1\text{máx}} = \frac{P_0 E_r r_0}{9 E_d (r_1 - r_0) + E_r r_1} \quad (5.7b)$$

$$r''_{2\text{mín}} = r_1 + \frac{P''_{1\text{mín}} r_1 E_d (r_1 - r_0)}{E_2 (P_0 r_0 - P''_{1\text{mín}} r_1)} \quad (5.7c)$$

$$r''_{2\text{máx}} = r_1 + \frac{P''_{1\text{máx}} r_1 E_d (r_1 - r_0)}{E_2 (P_0 r_0 - P''_{1\text{máx}} r_1)} \quad (5.7d)$$

Nas expressões acima r_0 , r_1 e r_2 denotam os raios interno e externo do duto (ou interno do reforço) e externo do reforço; E_d , E_r e E_2 indicam os módulos de elasticidade do duto, do reforço em compósito de fibra de vidro e da fase 2 do FGM.

A partir das expressões acima e dos dados fornecidos neste exemplo, obtêm-se os seguintes valores:

1ª Alternativa (compósito em fibra de vidro com resina polimérica):

$$P'_{1\text{mín}} = 0; P'_{1\text{máx}} = 0,68 \text{MPa}; r'_{2\text{mín}} = 0,2600; r'_{2\text{máx}} = 0,2889 \text{m};$$

Através da Eq. (3.3), determinam-se os valores da tensão circunferencial no duto reparado com material compósito convencional e na própria estrutura do reparo, para os quais foram obtidos os valores 57,32 MPa e 6,10 MPa, nesta ordem.

2ª Alternativa (material com gradação funcional em *Ti-TiB*):

$$P'_{1\text{mín}} = 1,55 \text{MPa}; P'_{1\text{máx}} = 1,73 \text{MPa}; r'_{2\text{mín}} = 0,2825; r'_{2\text{máx}} = 0,2889 \text{m};$$

Os valores admissíveis para as variáveis de projeto no caso do material com gradação funcional, pressão de contato e raio externo do reparo, estão indicados na Fig. 5-11.

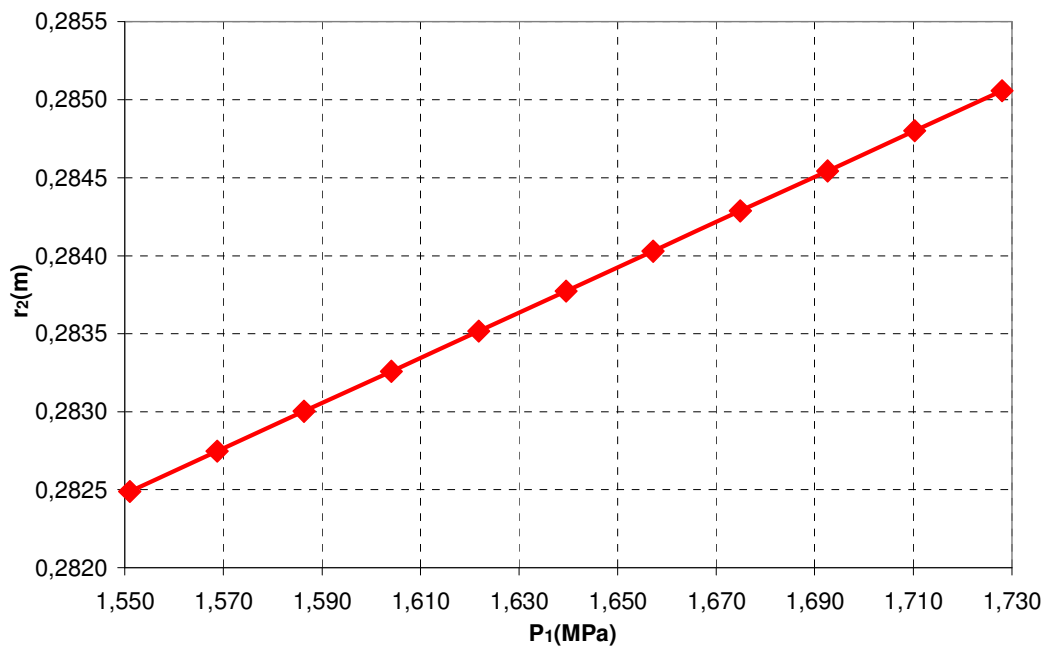


Figura 5-11 – Gráfico Pressão de contato X Raio externo necessário ao reparo (FGM).

A Fig. 5-12 apresenta um gráfico com os valores assumidos pela tensão do duto para diferentes espessuras do reparo, em FGM *Ti-TiB* e em material compósito convencional, dentro do limite exequível. Os valores limites da distribuição da tensão circunferencial no reparo em FGM estão contidos na Fig. 5-13.

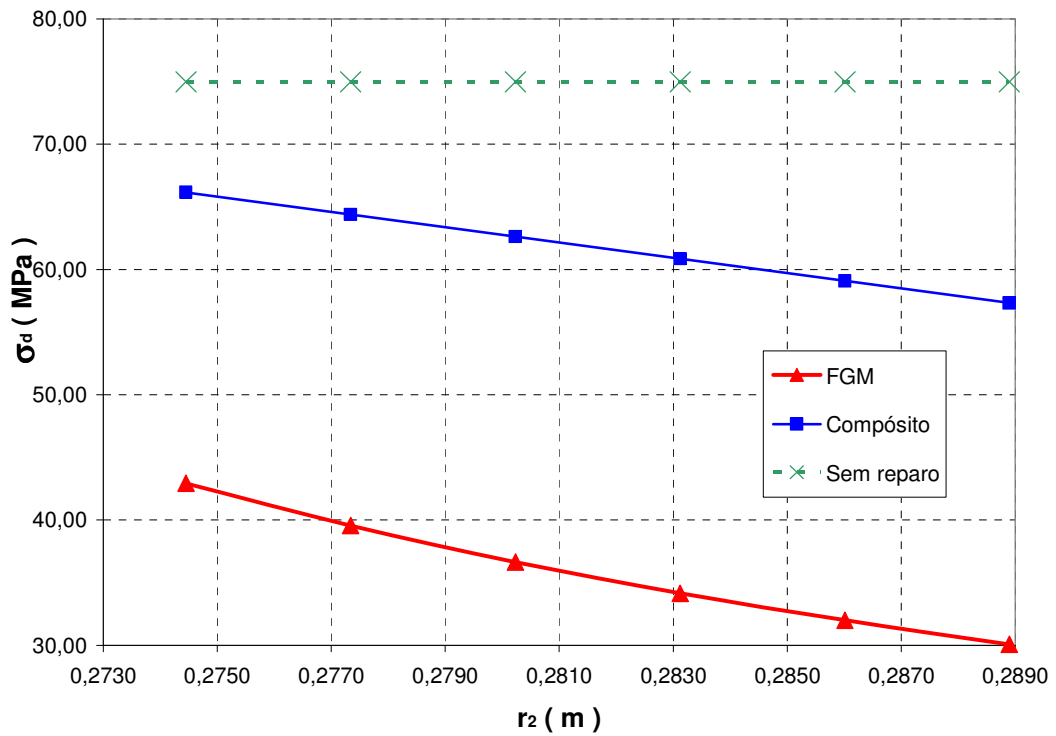


Figura 5-12 – Gráfico Tensão circunferencial do duto X Raio externo do reparo.

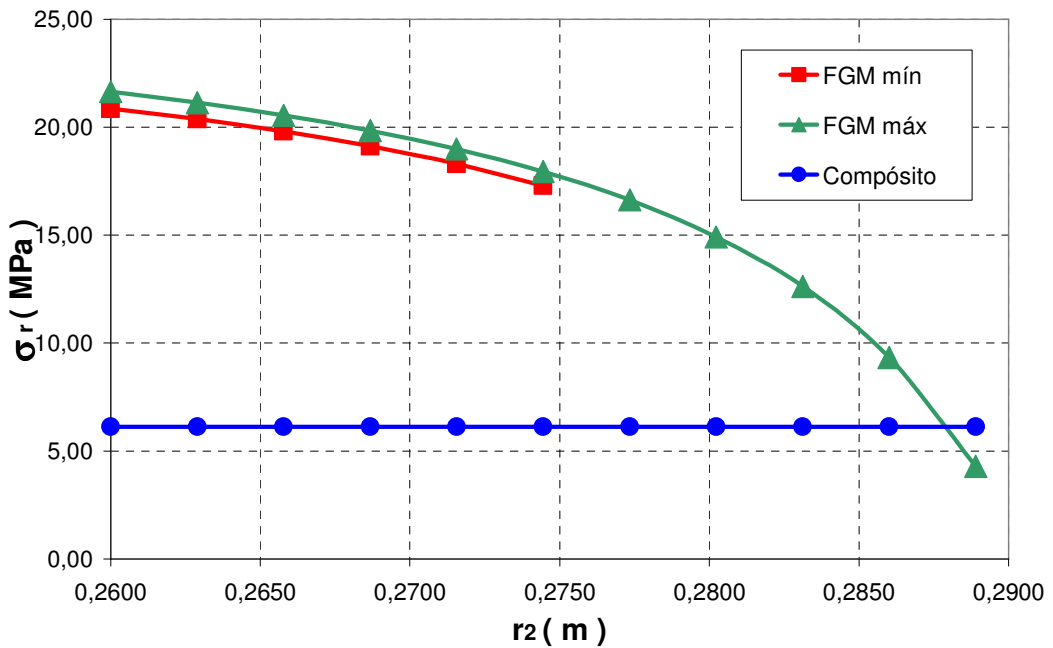


Figura 5-13 – Gráfico Tensão circunferencial no reparo X Raio externo do reparo (FGM).

Com intuito de avaliar a influência dos coeficientes de não-homogeneidade (p) e de transferência (q) no comportamento mecânico do reparo com material com gradação funcional, são calculadas as tensões circunferenciais na espessura do reparo, para um conjunto de valores distintos de p e de q , conforme está ilustrado na Fig. 5-14:

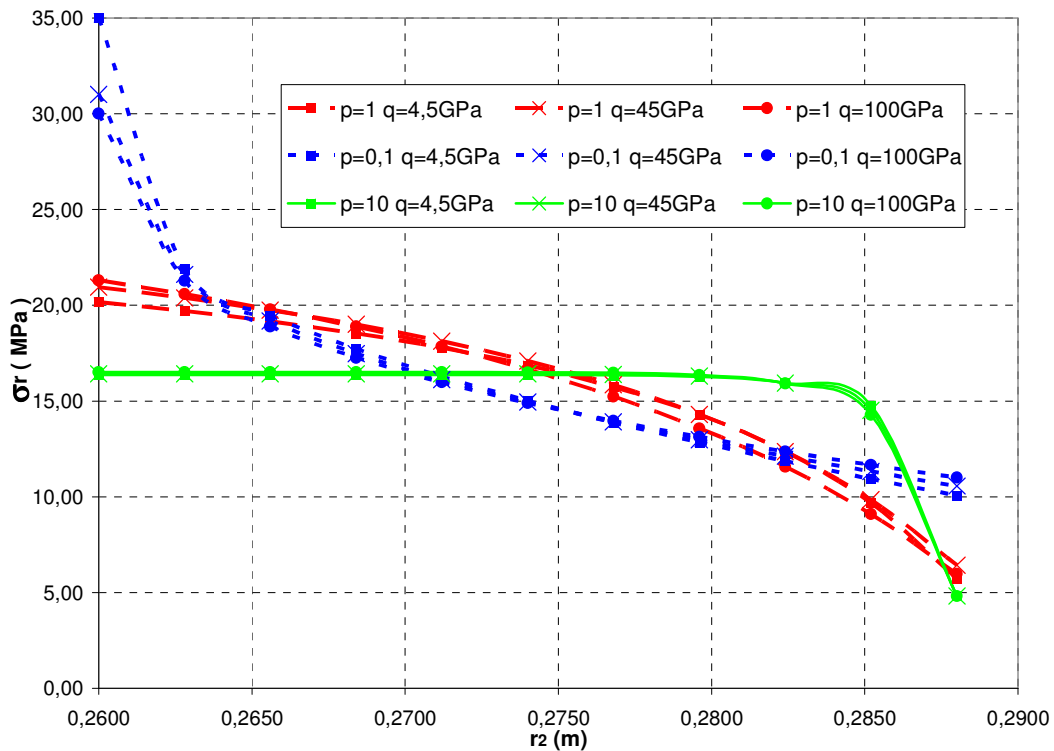


Figura 5-14 – Gráfico Tensão circunferencial no reparo X Raio admissível ao reparo para $p=0,1; 1,0; 10,0$ / $q=4,5; 45,0; 100$ GPa.

O reparo em FGM tendo como fase 1 (cerâmica) o monoboreto de titânio (TiB) e fase 2 (liga metálica) o titânio (Ti) levou a uma melhor resposta mecânica, se comparado com a alternativa em material compósito convencional (fibra de vidro com resina polimérica) proposta por CORTÊS (2001), como pode ser constatado no gráfico contido na Fig. 5-12, uma vez que as tensões circunferenciais presentes no duto reparado são expressivamente menores para a primeira opção. Cabe ressaltar que, embora a Fig. 5-13 indique que as tensões no reparo em material com gradação funcional em questão são, em geral, elevadas em relação aos resultados obtidos com o referido material compósito convencional, estes últimos apresentam menor resistência mecânica. A Fig. 5-14 aponta o comportamento assintótico da curva de distribuição da tensão circunferencial da camada de reparo para valores

elevados ($p=10$) do coeficiente de não-homogeneidade do FGM em *Ti-TiB*, e a pouca influência exercida pelo coeficiente de transferência (q) do material com gradação funcional neste caso, sendo este comportamento verificado na variação das propriedades materiais de um FGM, conforme as Figuras 2-11 e 2-12.

5.5 Exemplo 5

Neste estudo de caso, a fim de avaliar a influência da funcionalidade graduada dos FGMs no comportamento mecânico de reforço de dutos, propõe-se a análise de uma classe de material com gradação funcional, estabelecido a partir dos constituintes do material compósito convencional. Para tanto, investiga-se uma linha de duto (Tabela 5-19) sujeita à pressão interna e reforçada originalmente com material compósito em fibras de vidro com resina polimérica, de acordo com exemplo contido na dissertação de SILVA (2002) e que resultou na implementação do programa de análise de reforços chamado *DRE 2002*.

Tabela 5-19 – Propriedades e solicitações no duto

Raio externo (em <i>m</i>)	0.25
Raio interno (em <i>m</i>)	0.24
Módulo de elasticidade (em <i>GPa</i>)	200
Coefficiente de Poisson	0.3
Tensão de escoamento (em <i>MPa</i>)	133
Tensão última (em <i>MPa</i>)	146.3
Pressão interna (em <i>MPa</i>)	8.3

Na Tabela 5-20 são apresentadas as propriedades do compósito convencional, comumente empregado em reparo e reforço de dutos.

Tabela 5-20 – Propriedades do material compósito (SILVA, 2002).

Módulo de elasticidade circunferencial (<i>GPa</i>)	34.3
Módulo de elasticidade radial (<i>GPa</i>)	9.66
Coefficiente de Poisson	0,30
Tensão de escoamento (<i>MPa</i>)	325

A partir das conclusões obtidas do exemplo anterior optou-se por adotar os seguintes valores para os coeficientes de transferência e de não-homogeneidade, para ambos os materiais com gradação funcional considerados:

$$q = 4.5GPa \quad (5.8a)$$

$$p = 10 \quad (5.8b)$$

A pressão de operação limite entre os regimes elástico e plástico (P_{0p}) para o duto sem reforço é obtida através da expressão:

$$P_{0p} = \frac{\sigma_y(r_1 - r_0)}{r_0} = \frac{133 \times 0.01}{0.24} \therefore P_{0p} = 5.54 \text{ MPa} \quad (5.9)$$

Assim, como a pressão de operação (P_0) no presente estudo é maior do que este limite, conclui-se que o duto está sujeito a deformações plásticas. Com emprego de uma camada de reforço sobre o duto, há a conseqüente aplicação de pressão na interface, ou de contato, (P_1) entre os dois materiais, reduzindo a tensão circunferencial no duto, conforme pode ser verificado pela inspeção da Eq. 3.3.

Para o caso em que a camada de reforço é constituída de material compósito convencional, em fibra de vidro, têm-se os seguintes valores de pressão máxima, função dos limites mecânicos dos materiais envolvidos, e mínima, devidas a restrições geométricas do duto de paredes finas, no contato entre o duto e o reforço:

$$P'_{1\text{mín}} = \frac{P_0 r_0 - \sigma_{\text{máx}}(r_1 - r_0)}{r_1} = \frac{8.3 \times 0.24 - 146.3 \times 0.01}{0.25} \therefore P'_{1\text{mín}} = 2.116 \text{ MPa} \quad (5.10a)$$

$$P'_{1\text{máx}} = \frac{E_r \sigma_{\text{máx}}}{9E_d} = \frac{34.4 \times 146.3}{9 \times 200} \therefore P'_{1\text{máx}} = 2.790 \text{ MPa} \quad (5.10b)$$

Conseqüentemente, obtêm-se os valores limites do raio externo do referido reforço, conforme segue:

$$r'_{2\text{mín}} = r_1 + \frac{P'_{1\text{mín}} r_1 E_d}{E_r \sigma_{\text{máx}}} \therefore r'_{2\text{mín}} = 0.271 \text{ m} \quad (5.11a)$$

$$r'_{2\text{máx}} = r_1 + \frac{P'_{1\text{máx}} r_1 E_d}{E_r \sigma_{\text{máx}}} \therefore r'_{2\text{máx}} = 0.277 \text{ m} \quad (5.11b)$$

Empregando-se o reforço do referido material compósito com a variação contínua da composição dos seus constituintes, chegam-se aos seguintes valores admissíveis para a pressão de contato:

$$P''_{1\text{mín}} = 2.116 \text{ MPa} \quad (5.12a)$$

$$P''_{1\text{máx}} = \frac{E_2 \sigma_{\text{máx}}}{9E_d} = \frac{74 \times 146.3}{9 \times 200} = 6.015 \text{ MPa} \quad (5.12b)$$

$$P''_{1m\acute{a}x2} = \frac{P_0 r_0}{r_1} = \frac{8.3 \times 0.24}{0.25} = 7.968 \text{MPa} \quad (5.12c)$$

$$\therefore P''_{1m\acute{a}x} = 6.015 \text{MPa} \quad (5.12d)$$

O raio externo do reforço assume neste caso os seguintes valores limites:

$$r''_{2m\acute{i}n} = 0.259 \text{m} \quad (5.13a)$$

$$r''_{2m\acute{a}x} = 0.277 \text{m} \quad (5.13b)$$

A pressão de operação limite em regime elástico para o duto reforçado é expressa por:

$$P_{0lim} = \frac{\sigma_y (r_1 - r_0) + \frac{E_r \sigma_p r_1}{9E_d}}{r_0} \quad (5.14)$$

Para o compósito convencional e o FGM, ambos em fibra de vidro com resina polimérica, têm-se, respectivamente:

$$P'_{0lim} = 8.44 \text{MPa} \quad (5.15a)$$

$$P''_{0lim} = 11.88 \text{MPa} \quad (5.15b)$$

A relação entre a tensão circunferencial no duto com e sem reforço em material compósito convencional e a pressão de operação (interna) admissível ao duto está descrito está presente na Fig. 5-15:

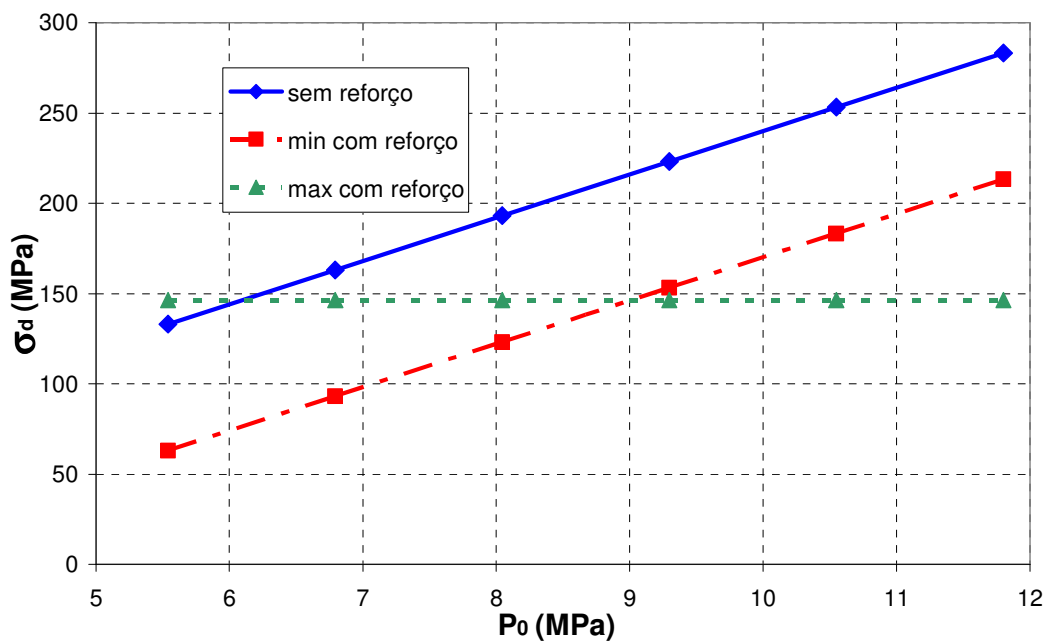


Figura 5-15 – Gráfico Tensão circunferencial no duto X pressão de operação no duto.

A Fig. 5-16 ilustra a relação entre a tensão circunferencial no duto reforçado e o raio externo adotado ao reforço, tanto para o material compósito convencional quanto para os com gradação funcional, dentro dos limites admissíveis a um reforço de paredes finas.

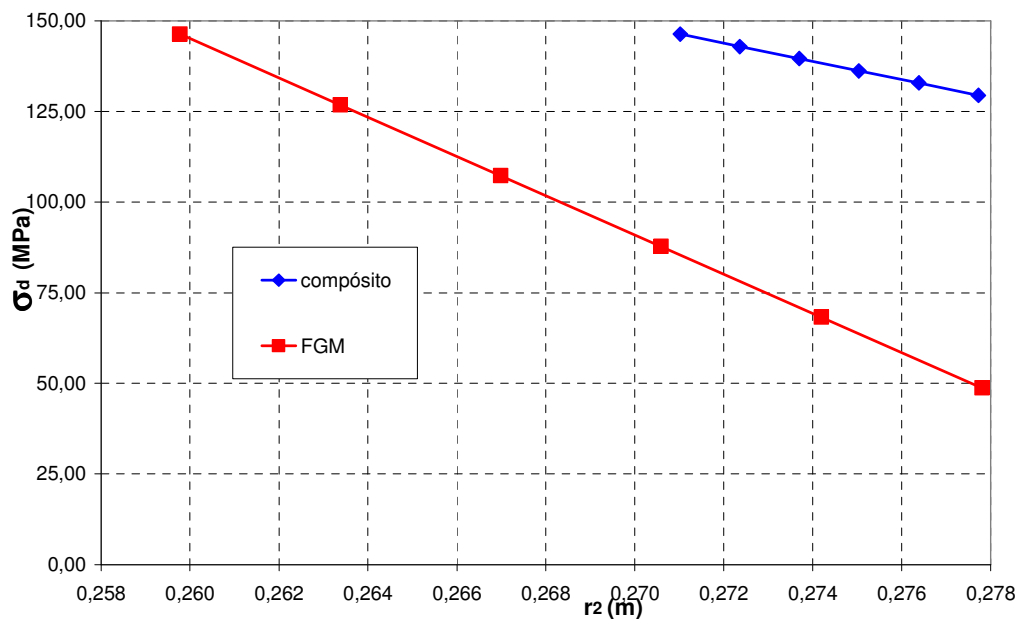


Figura 5-16 – Gráfico Tensão circunferencial no duto reforçado X raio externo do reforço.

Em termos do comportamento mecânico do reforço, a tensão circunferencial máxima com emprego de material compósito convencional é igual a 25.16 MPa . Já a Fig. 5-17 apresenta a tensão circunferencial máxima no reforço, dentro dos valores admissíveis ao raio externo do reforço, para os dois materiais com graduação funcional, com os coeficientes de não-homogeneidade e de transferência previamente definidos ($p=10$; $q=4.5 \text{ GPa}$).

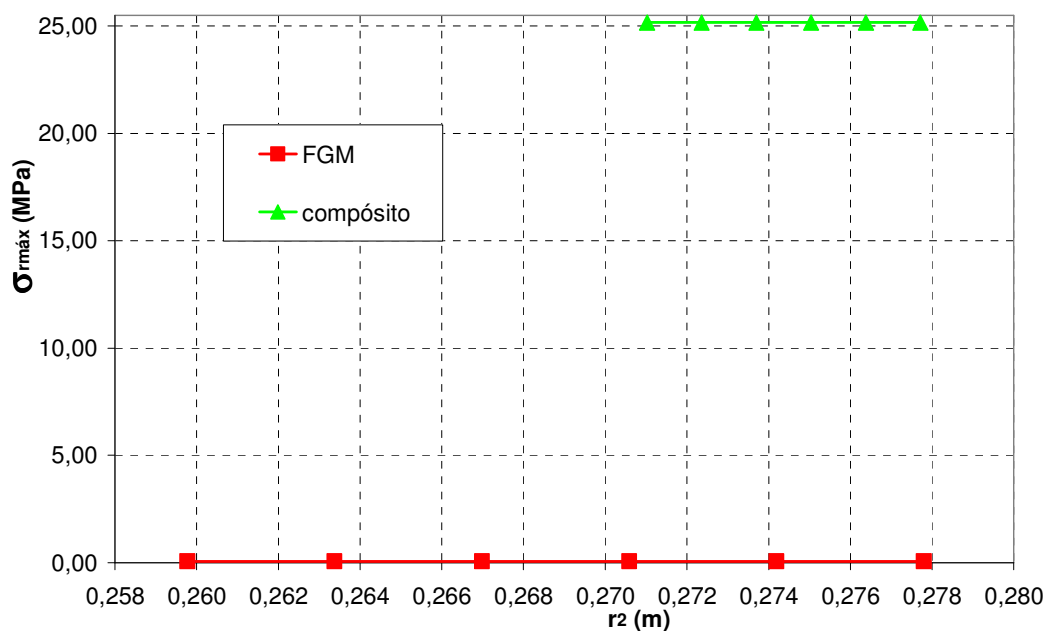


Figura 5-17 – Gráfico Tensão circunferencial máxima no reforço X raio externo do reforço ($p=10$; $q=4.5 \text{ GPa}$).

Neste exemplo, em que se comparou o comportamento de um duto reforçado com duas categorias distintas de reforço, em material compósito convencional e em FGM, a partir dos mesmos constituintes, foi constatado o caráter uniforme dos resultados, sendo que a segunda alternativa conduziu a menores tensões, tanto no duto (Fig. 5-16), quanto na camada do reforço (Fig. 5-17), o que indica o nível de excelência da funcionalidade graduada no desempenho mecânico das estruturas reforçadas.

6 Conclusões e sugestões

! " #
\$ % &
. %
()
* + #
, -
!
% (&
& + ,
. ! / 0! 1 2 0 3 4 5 6 7 7 8 % &
* # 9: 9: 5; : 2
<=9: 13 6778
! &
& *

/ > ?
; (" "
@

- 4 " A
 1 B: ; 9 A
 #

- !
 ? / ?
 / B
 %

- 4
 ! C<: B4 -8DD-
 + - />?
 . "

‡ ! E! F; ! 59 677G

- 1 . />?

- & & #

7

Referências bibliográficas

Higher-order theory for functionally graded materials. ! "###

\$ % & Optimum material distributions for prescribed apparent fracture toughness in thick-walled FGM circular pipes. ' (') (* ' + , - .!!"

* Avaliação numérica da capacidade de carga de dutos corroídos. /0 + + 1)B 4 + + 5'3 + + 6 7 8.!!!.

9 Analysis and Testing of the Armor Plate Pipe Wrap Repair System. ' 3 "##-

7 ": Manual for Determining the Remaining Strength of corroded pipelines – A supplement to ANSI/ASME B31 Code for pressure piping. 9; 3 3 <) 3; 3 ' "##"

9& % Finite element procedures in engineering analysis. = < 3 7& " 3 "##>

\$? & 9 Resistência dos Materiais. O (' % @ "##A

* 9 Modelagem do comportamento termo-mecânico transiente de estruturas de materiais compósitos. /0 + + 1 4 + + \$ + ' + ' 6 \$ 8.!!!>

& & B Averaging and finite-element discretization approaches in the numerical analysis of functionally graded. ' 3 3 ? !. "-,7"#> .!!"

& & C Material composition optimization for heat-resisting FGMs with artificial neural network. A .!!D

% : www.clockspring.com. 3 "!!E>E!!A

C Western European cross-country oil pipelines 30 - year performance statistics. 4) ' + C (' .!!!.

9 \$ Sustentabilidade da integridade de dutos. 9 5' , - .!!D

9F Dimensionamento de reforços em dutos metálicos com compósitos de matriz polimérica. /O + + 1 4 + + \$ + '\$(6 \$\$\$8.!!"

& The Assessment of Pipeline Defects. 9(' (D') 3 6 .!!!.8.!!!.

G Resistência de dutos com defeitos usinados. /O + + 1)B 4 + + 5'3 + + 6 7 8 .!!!.

*7 7\$!" Corroded pipelines – Recommended Practice RP-F101. @ * "###

\$ B 9 Materiais compósitos para reparo de dutos terrestres. 9 + + (+ 1 4 + + \$ + '+ + 6 \$ 8.!!A

: Summary of validation of Clockspring for permanent repair of pipeline corrosion defects. : 7#-E... "##-

: % & : 9 * * : H : 9 Design and fabrication of symmetric FGM plates. ' 3 3 \$ (* ' D. 7D.A . 7. - .!!!

: \$ Principles of Composite Materials Mechanics. = B @ + 3 = & " "##

& & Análise estrutural de dutos reparados por material compósito. /O + + 1 4 + + \$ + '+ + 6 \$ 8"###

& 9 Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicações das curvas de resistência J- a para previsão de colapso em dutos. 9 + + (+ 1 4 + + + O (6 8.!!D

& Mechanical and thermal stresses in a functionally graded hollow cylinder due to radially symmetric loads. ' (') (* ' + ,# .!!!.

G& : & Cohesive fracture modeling of elastic-plastic crack growth in functionally graded materials. \$ 3(3; 3 ,! .!!!

G& & Crack growth resistance behavior of a functionally graded material: computational studies. \$ 3(3; 3 ," .!!!D

% C % C 9 Concept and P/M fabrication of functionally graded materials. 3 ' ># "--A"#"'.
"##A

% & : & Isoparametric graded finite elements for nonhomogeneous isotropic and orthotropic materials. 9 3)
; ># "--A"#"'. .!!!.

I G \$ Análise Não-Linear da Interação Solo-Duto em Encostas Empregando Elementos de Interface. /O + + 1
4 + + \$ + '+ J6 \$ 8 .!!!D

G G Internally circumferentially cracked cylinders with functionally graded material properties. ' (') (4 ' + ,A "##-

Reforço de vasos de pressão por material compósito de matriz polimérica. /O + + 1 4 + + \$ + '+ + 6 \$ 8 "###

Plasticity Theory. = B @ 3 " (K' ;
"##!

%C 9& & A model of structure optimization for a functionally graded material. ' .. "##A

L Modelo numérico para o estudo do comportamento de dutos enterrados. /O + + 1)B 4 + + 5'3 + + 6 7 8 .!!!

9 & Functionally graded metals and metal-ceramic composites: Part 1 Processing. ' ' 4 = * 'D! M> "##A

9 & Functionally graded metals and metal-ceramic composites: Part 2 Thermomechanical behaviour. ' ' 4 = * 'D. M "##,

\$ Microstructural optimization of a functionally graded transversely isotropic layer. 3, 3) ' " "###

9 Safety Report: Transportation Safety Database. ' 9) < + .!!!.

9 % 9 Composite repair technology in plants and refineries. () 9 3, ' <) 3 6 9 8 .!!!"

9 www.rust.com.br 3 "!"E>E!!A

* Dimensionamento de reforços à base de compósitos poliméricos para a extensão da vida de dutos elasto-plásticos. /O + + 1 4 ++ \$ + '\$'(6 \$\$\$8.!!!.

* Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X80 e determinação experimental de curvas J-R para avaliação da tenacidade a fratura. /O + + 1 4 +++ O (' 6 8.!!!D

& Desenvolvimento de matriz polimérica para material compósito visando o reforço de dutos de aço. /O + + 1 4 ++ \$ + '+ + 6 \$ 8.!!!A

Desenvolvimento de sistema para reparo de dutos submarinos utilizando materiais compósitos. 9 + + (+ 1 4 ++ \$ + '+ + 6 \$ 8.!!!D

G Avaliação estrutural de dutos com defeitos de corrosão reais. /O + + 1)3 4 ++ 5'3 + + 6 7 8.!!!

G \$ Análise não-linear via elementos finitos de um modelo de um elemento de vigas para dutos enterrados. /O + + 1 4 ++ \$ + '+ J6 \$ 8.!!!A

9 : % www.strongbackcorp.com 3 "!"E>E!!A

9 N Técnicas experimentais para a avaliação da tenacidade à fratura de materiais compósitos para reparo de dutos. /O + + 1 4 ++ \$ + '+ + 6 \$ 8.!!!D

9 9 & B Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composite materials. 9; 7C " + (3(# .!!!"

9 9 G9 % Exact solutions for stresses in functionally graded pressure vessels. . .!!!"

B & G : & Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions. 3 ' A .!!!D

G& G ? B C Pipeline beam models using stiffness property deformations relations. (') 9 "##>

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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