



Luana de Brito Costa

**Avaliação do Envelhecimento de Reparos Estruturais
Constituídos de Materiais Compostos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. José Luiz de França Freire

Co-orientador: Prof. Ronaldo Vieira

Rio de Janeiro
Agosto de 2010



Luana de Brito Costa

**Avaliação do Envelhecimento de Reparos Estruturais
Constituídos de Materiais Compostos**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-
Rio. Aprovada pela comissão examinadora abaixo

Prof. José Luiz de França Freire

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Ronaldo Vieira

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Arthur Braga

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Ana Rosa F. de Aguiar Martins

Engenheira de Pesquisa – ITUC-Rio

Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Lea

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de agosto de 2010

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

Luana de Brito Costa

Graduou-se em Engenharia Civil na UFPB (Universidade Federal da Paraíba) em 2005. Após a graduação, recebeu uma bolsa de estudos (JASSO) do governo Japonês, atuando como pesquisadora por um período de um ano na Universidade de Ehime, em Matsuyama, Japão.

Ficha Catalográfica

Costa, Luana de Brito

Avaliação do envelhecimento de reparos estruturais constituídos de materiais compostos / Luana de Brito Costa ; orientador: José Luiz de França Freire ; co-orientador: Ronaldo Vieira. – 2010.

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

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Envelhecimento. 3. Material composto. 4. Reparo. 5. Radiação UV e temperatura. I. Freire, José Luiz de França. II. Vieira, Ronaldo . III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Agradecimentos

Aos professores José Luiz de França Freire e Ronaldo Vieira, pela paciência e orientação durante todo o desenvolvimento do mestrado.

A ANP (Agência Nacional de Petróleo) pela bolsa de estudos que me foi concedida.

Aos professores Theodoro A. Netto e Marysilvia F. Costa da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pela atenção no início dos meus estudos.

Aos meus amigos de laboratório, Jesus, Jaime, Gilmar, Jorge, Leonardo e Tito, em especial à Maira, Marco e Gerardo, pelos seus conselhos, ajuda, paciência e bons desejos.

Aos funcionários das empresas Flama pelo auxílio na preparação dos materiais experimentais.

Ao ITUC pela presteza e auxílio durante a realização dos trabalhos experimentais. Em especial, o meu muito obrigado ao Jorge Laje, a Ana Rosa e ao pessoal do laboratório que realizou todos os ensaios.

Ao Luiz Octávio e Walderez Santos da empresa OPTEC pela atenção, fornecimento e aplicação de todo o material composto utilizado.

À minha família, em especial minha mãe e minha tia, Tim, Léo e meus amigos do Rio de Janeiro e de João Pessoa, pelo suporte e apoio incondicional em todos os momentos.

Ao Dep. de Engenharia Mecânica da PUC – Rio, aos professores e seus funcionários, por todo ensino e colaboração, em especial a Rosely.

A todos aqueles que de alguma outra forma participaram desta tese.

A Deus.

Resumo

Costa, Luana de Brito; Freire, José Luis de França; Vieira, Ronaldo Domingues. **Avaliação do Envelhecimento de Reparos Estruturais Constituídos de Materiais Compostos**. Rio de Janeiro, 2010. 193p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho analisa o impacto do envelhecimento dos materiais compostos (fibra de vidro e resina epóxi) utilizados como elemento estrutural de reforço em dutos (reparo). O estudo envolveu etapas de revisão bibliográfica, desenvolvimento de métodos experimentais de envelhecimento, testes e análise estatística dos resultados. Um procedimento envolvendo testes com amostras que sofreram envelhecimento acelerado foi desenvolvido objetivando encontrar possíveis parâmetros indicativos de envelhecimento estrutural (módulo de elasticidade E , deformação máxima δ e limite de resistência a tração S_u). Os testes envolveram amostras submetidas a ambientes com radiação UV, temperatura de 70°C e água a temperatura de 70°C. Para desenvolvimento do estudo, foram utilizados 10 espécimes de tubos de aço com 75 mm de diâmetro e 2 mm de espessura de parede, onde em 9 deles foram usinados rebaixos na superfície externa para simular defeitos longitudinais, representando perdas de espessura por corrosão. Em seguida, os espécimes com defeito foram reparados com 8 camadas de material composto. Foram confeccionados ainda 49 corpos de prova retangulares, a partir de placas de 25cmx25cm, para a realização de ensaios de tração e flexão. Depois de envelhecidos, os espécimes foram submetidos a ensaios de tração (ASTM – 3039), flexão (ASTM D790) e ruptura dos tubos submetidos à pressão interna, objetivando investigar variações dos parâmetros estruturais E , δ e S_u , para verificar a possível ocorrência de degradação. Assim, através de observações visuais e da variação das propriedades, pode-se perceber que em nenhum dos resultados, foi possível comprovar de fato o envelhecimento do material. Alguns resultados apresentaram variações no E e S_u , porém estas não foram significativas e/ou conclusivas para garantir o comprometimento do uso de tal material.

Palavras-chave

Envelhecimento; material composto; reparo; radiação UV; temperatura.

Abstract

Costa, Luana de Brito; Freire, José Luis de França; Vieira, Ronaldo Domingues. **Evaluation of aging of structural repair performed with composite material.** Rio de Janeiro, 2009. 193p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The findings of a research program on the impact of aging of composite materials used as structural elements for pipe repairs are presented in this paper. The research involved literature review, planning and development of experimental methods for accelerated aging, testing of specimens, and statistical analysis of test results. An accelerated aging process was designed and developed in order to determine the effects of aging on the mechanical properties of glass reinforced epoxy composites subject to environments with UV radiation or air and water temperatures of 70 degrees Celsius. Ten samples of three-inch diameter thin walled pipes were used for testing. Nine of the samples had longitudinal defects machined on their external surface in order to simulate metal loss or thinning caused by localized corrosion. The sample pipes were subsequently repaired with eight layers of composite material. To complement the study, 49 samples with rectangular cross-sections were aged and tested by traction and bending. After the simulated aging process was completed, the specimen samples were subjected to tensile tests (ASTM - 3039), bending, or internal pressure until ruptured in order to assess their possible degradation levels. ISO 24817 standards were used to help with test result analysis.

Considering visual observation and measured variation of mechanical properties, it was concluded that aging of the material could not be ascertained from any of the results. Although, some of the results showed variation on the Young Modulus (E) and Rupture Strength (Su), the results were neither significant nor conclusive in order to guarantee that structural deterioration of the material or of the specimens had occurred at non acceptable levels.

Keywords

Aging; composite material; repair; UV radiation; temperature.

Sumário

1.	Introdução	20
1.1	Objetivo geral	20
1.2	Objetivos específicos	20
1.3	Motivação	20
1.4	Considerações iniciais	21
1.5	Roteiro da dissertação	25
2.	Revisão bibliográfica	26
2.1	Materiais compostos	26
2.2	Envelhecimento	48
2.3	Tipos de exposições para envelhecimento	68
3.	Modelagem do cálculo do reparo	71
3.1	Introdução	71
3.2	Análise mecânica do material composto	72
3.3	Modelagem do cálculo do reparo	77
3.4	Equações semi-empíricas para dutos com defeitos de corrosão	80
3.5	Análise do conjunto duto/reparo	83
3.6	Cálculo do número de camadas do reparo	84
4.	Preparação experimental	103
4.1	Ambientes de envelhecimento	103
4.2	Estruturação	104
5.	Resultados	124
5.1	Distribuição dos corpos de prova	124
5.2	Resultados	127
6.	Discussões	137

6.1	Radiação UV	137
6.2	Água em temperatura de 70°C	141
6.3	Temperatura de 70°C	143
6.4	Comparativo Radiação UV/Água em temperatura de 70°C/temp. de 70°C	146
7.	Conclusões e recomendações	148
7.1	Conclusões	148
7.2	Recomendações	149
8.	Referências Bibliográficas	151
9.	Glossário	155
10.	Apêndice	160

Lista de figuras

Figura 1.1 - Aplicações de reparo de material composto	2
Figura 1.2 - Esquema do duto, dano e reparo	26
Figura 2.1 - Relação entre densidade e resistência	29
Figura 2.2 - Relação entre rigidez e resistência específicas	29
Figura 2.3 - Relação entre resistência e alongamento	30
Figura 2.4 - Classificação dos tipos de compostos	30
Figura 2.5 - Exemplos de compostos reforçados: (A) por partículas aleatórias; (B) por fibras descontínuas unidirecionais; (C) por fibras descontínuas aleatórias; (D) por fibras contínuas unidirecionais; (E) por fibras contínuas perpendicular	30
Figura 2.6 - Exemplos de aplicação de FRP	31
Figura 2.7 - Propriedades mecânicas das resinas poliéster, vinil éster e epóxi	33
Figura 2.8 - Estrutura química de um polímero epóxi	34
Figura 2.9 - Taxa de deformação x variação de temperatura	35
Figura 2.10 - Módulo de Elasticidade ξ x Temperatura	35
Figura 2.11 Diagrama típico dos materiais poliméricos	37
Figura 2.12 - Deformação de um material viscoelástico submetido a uma tensão constante durante o tempo t_1	38
Figura 2.13 - Módulos de elasticidade tangente e secante	40
Figura 2.14 - Fluência e recuperação de um material polimérico	41
Figura 2.15 - Efeito da temperatura nos polímeros	42
Figura 2.16 - Diagrama tensão versus extensão, de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço	44
Figura 2.17 - Produtos em fibra de vidro	46
Figura 2.18 - Figura esquemática da estrutura do vidro	47
Figura 2.19 - Comportamento mecânico dos CRFVs	54
Figura 2.20 – Região espectral da radiação ultravioleta	58
Figura 2.21 – Espectro Eletromagnético	58

Figura 2.22 – Distribuição da energia emitida pelo sol	59
Figura 2.23 – Ilustração dos processos de iniciação e propagação do polipropileno.	65
Figura 2.24 – Processo de iniciação e propagação da molécula da resina Epóxi	65
Figura 3.1 – Elemento representativo do Volume (RVE)	73
Figura 3.2 – Direções principais 1-2 em uma lâmina de compostos	74
Figura 3.3 – Módulo de Elasticidade dos materiais compostos	76
Figura 3.4 - Representação de tensões atuantes em uma tubulação	77
Figura 3.5 – Cálculo da tensão circunferencial	78
Figura 3.6 – Cálculo da tensão longitudinal	79
Figura 3.7 – Idealização da geometria de um defeito	80
Figura 3.8 – Resistência x Deformação	81
Figura 3.9 - Comportamento de um duto reparado utilizando uma luva de material compósito	84
Figura 3.10 – Exemplo de regiões de comportamento de um duto reparado com material compósito (Região I: Regime elástico / Região II: Regime plástico / Região III: início da planificação)	86
Figura 3.11 – Resultado da modelagem matemática para o duto com reparo de material composto	88
Figura 3.12 – Comparativo entre diversas espessuras de camada de reparo	89
Figura 3.13 - Área danificada do duto, mostrando a pressão P e a tensão aplicada na camada do duto e do reparo	90
Figura 3.14 – Comprimento total do reparo	96
Figura 3.15 - Comprimento total do reparo limitado em apenas um lado	97
Figura 3.16 - Comprimento total do reparo limitado nos dois lados	98
Figura 3.17 - Fluxograma de cálculo do reparo segundo a	100

ISO24817	
Figura 3.18 - Esquema duto versus reparo	101
Figura 4.1 - Dutos	105
Figura 4.2 - Defeito usinado	105
Figura 4.3 - Material composto	106
Figura 4.4 - Sequência de aplicação do reparo	108
Figura 4.5 – Espectro Luz Negra	110
Figura 4.6 - Câmara de envelhecimento	111
Figura 4.7 - Dados metrológicos retirados de Teresópolis	112
Figura 4.8 – Distribuição da radiação dentro da câmara.	113
Figura 4.9 - Forno Photolastic	116
Figura 4.10 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração – ISO24817	119
Figura 4.11 - Corpos de prova dos ensaios de tração	119
Figura 4.12 - Máquina com corpo de prova para ensaio de tração	120
Figura 4.13 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de flexão	120
Figura 4.14 - Máquina com corpo de prova para ensaio de flexão	120
Figura 4.15 - Conjunto Bomba / Acessórios	121
Figura 4.16 - Equipamentos utilizados no Ensaio de ruptura	123
Figura 5.1 - Espécimes dentro da câmara de radiação UV	125
Figura 5.2 - (a) Vista geral do corpo de prova após o ensaio de queima; (b) Orientação das fibras com relação ao cp.	128
Figura 6.1 - Efeito da radiação sob a coloração	138
Figura 6.2 - Alteração da cor e perda de brilho	138
Figura 6.3 - Reparos expostos à radiação	138
Figura 6.4 - Material exposto à radiação	138
Figura 6.5 - Cp submetidos a ensaio de tração	140
Figura 6.6 - Cp submetidos à água em temperatura de 70°C	141
Figura 6.7 - Cp submetidos à água em temperatura de 70°C	143
Figura 6.8 - Cp submetidos à temperatura de 70°C	143
Figura 6.9 - Cp submetidos à condição de temperatura à 70°C	144

Figura 6.10 - Cp submetidos ao ensaio de tração	146
Figura 6.11 - Cp submetidos ao ensaio de flexão	147
Figura 6.12 - Cp submetidos ao ensaio de flexão	147

Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Principais tipos de reparos

Tabela 1.2 - Principais tipos de reparos de materiais compostos

Tabela 2.1 - Comparação das resinas Poliéster, Vinil Ester e Epóxi

Tabela 2.2 - Relações entre a rigidez e a ductilidade

Tabela 2.3 - Comparativo entre as características dos diversos tipos de fibra

Tabela 2.4 - Propriedades típicas de algumas fibras e do aço

Tabela 2.5 - Características da fibra de vidro

Tabela 2.6 - Tipos de fibras de vidro para reforço

Tabela 2.7 - Composição da fibra tipo E

Tabela 2.8 - Característica dos compostos analisados

Tabela 2.9 - Degradação de polímeros

Tabela 2.10 - Intensidade de radiação global

Tabela 2.11 - Comparação de algumas energias de ligação covalente versus comprimentos de onda de correspondente quanta de energia -
Plastics additives handbook

Tabela 3.1 - Métodos para cálculo da pressão de operação nos dutos com defeito

Tabela 3.2 - Fatores para cálculo da pressão de operação (PDef) em dutos com defeitos de corrosão

Tabela 3.3 - Planilha de cálculo segundo ISO 24817

Tabela 4.1 - Medição da espessura do duto

Tabela 4.2 - Profundidade dos defeitos

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas (informações do fabricante)

Tabela 4.4 - Especificações técnicas (informações do fabricante)

Tabela 4.5 - Testes realizados (informações do fabricante)

Tabela 4.6 - Dados Metrológicos

Tabela 4.7 - Cronograma geral de envelhecimento

Tabela 4.8 - Geometria dos corpos de prova – ISO24817

Tabela 5.1 - Distribuição dos cp não envelhecidos

Tabela 5.2 - Distribuição de envelhecimento dos cp submetidos à radiação UV

Tabela 5.3 - Distribuição de envelhecimento dos cp submetidos à água a 70°C

Tabela 5.4 - Distribuição de envelhecimento dos cp submetidos à temperatura de 70°C

Tabela 5.5 - Porcentagem de ganho de massa

Tabela 5.6 - Porcentagem de resina

Tabela 5.7 - Resultado dos ensaios de tração

Tabela 5.8 - Resultado dos ensaios de flexão

Tabela 5.9 - Resultado dos ensaios de ruptura

Tabela 6.1 - Resultado ISO 24817 – Pós-envelhecimento (UV)

Tabela 6.2 - Resultado ISO 24817 – Pós-envelhecimento (Água em temperatura de 70°C)

Tabela 6.3 - Resultado ISO 24817 – Pós-envelhecimento (Temperatura de 70°C)

Lista de gráfico

Gráfico 5.1 - Ensaios de tração – UV

Gráfico 5.2 - Ensaios de tração – UV – Mód. de Elasticidade

Gráfico 5.3 - Ensaios de tração – Água em temperatura de 70°C

Gráfico 5.4 - Ensaios de tração – Água em Temperatura de 70°C – Mód. de Elasticidade

Gráfico 5.5 - Ensaios de tração – Temperatura de 70°C

Gráfico 5.6 - Ensaios de tração – Temperatura de 70°C – Mód. de Elasticidade

Gráfico 5.7 - Variação da tensão de ruptura no tempo – UV

Gráfico 5.8 - Variação da tensão de ruptura no tempo – Água em temperatura de 70°C

Gráfico 5.9 - Variação da tensão de ruptura no tempo – Temp. de 70°C

Gráfico 5.10 - Variação da tensão de ruptura no tempo

Gráfico 5.11 - Ensaios de Flexão – UV

Gráfico 5.12 - Ensaios de flexão – UV – Mód. de Elasticidade

Gráfico 5.13 - Ensaios de Flexão – Água em temperatura de 70°C

Gráfico 5.14 - Ensaios de flexão – Água em Temperatura de 70°C – Mód. de Elasticidade

Gráfico 5.15 - Ensaios de Flexão – Temperatura de 70°C

Gráfico 5.16 - Ensaios de flexão – Temperatura de 70°C – Mód. de Elasticidade

Gráfico 5.17 - Variação da tensão no tempo – UV

Gráfico 5.18 - Variação da tensão no tempo – Água em temperatura de 70°C

Gráfico 5.19 - Variação da tensão no tempo – Temperatura de 70°C

Gráfico 5.20 - Variação da tensão de ruptura no tempo

Gráfico 5.21 - Ensaios de Ruptura – Dutos

Gráfico 5.22 - Variação da Tensão de Ruptura no tempo – UV

Gráfico 5.23 - Variação do volume no tempo – UV

Gráfico 5.24 - Comparativo – Não envelhecido versus 12 semanas de envelhecimento

Lista de símbolos

A	Área
A_0	Área longitudinal da seção com defeito
C	Velocidade da luz no vácuo (299 792 458 m/s)
C	Parâmetro que relaciona áreas
D	Espessura remanescente do duto com defeito
D	Diâmetro médio do cilindro
e_{rep}	Espessura por camada de reparo
E	Módulo de Elasticidade
E	Energia, denominada quantum
E_f	Módulo de elasticidade da fibra
E_m	Módulo de elasticidade da matriz
E_d	Módulo de elasticidade do duto
E_C	Módulo de elasticidade circunferencial
E_L	Módulo de elasticidade longitudinal
E_r	Módulo de elasticidade do reparo
ε	Deformação
ε_{uRep}	Deformação máxima do reparo
ε_e	Deformação elástica instantânea
ε_d	Deformação elástica retardada
ε_v	Fluidez viscosa
ξ_g	Módulo vítreo
ξ_r	Módulo emborrachado
F_{ext}	Força externa aplicado no duto
F_{int}	Força interna aplicada no duto
F	Fator de Folias
F_{eq}	Força axial equivalente
H	Constante de Planck (6,6.10-27 erg.s)
K_n	Representa o valor de determinada propriedade dos compostos
L	Comprimento do duto
L_{Rep}	Comprimento total do reparo

l_{extra}	Comprimento axial extra do reparo
$l_{defeito}$	Comprimento axial do defeito
$l_{chanfro}$	Comprimento axial do chanfro
$l_{disponível}$	Comprimento fisicamente disponível para aplicação do reparo sobre defeito.
L_{DC}	Carga limite ao colapso plástico do componente danificado
L_{UC}	Carga limite ao colapso plástico do componente sem defeito
M	Fator de dilatação
$MAOP$	Pressão máxima de operação admissível
M_{ax}	Momento axial aplicado
N	Número de camadas de reparo
P	Pressão interna atuando sob o duto
P_{eq}	Pressão equivalente a projetada
P_{Proj}	Pressão de projeto
P_{Def}	Pressão de operação do duto com defeito
P_{rup}	Pressão de ruptura do duto novo sem reparo e sem defeito
$P_{yaço}$	Pressão na qual o duto começa a escoar
P_{falha}	Pressão de falha do duto
p_{live}	Pressão interna dentro do duto durante a aplicação do reparo
RSF	Fator de Resistência Remanescente
R	Raio interno
S_{uRep}	Limite de ruptura do reparo
S_{ycola}	Limite de ruptura da resina (cola/adesivo)
S_{flow}	Tensão de escoamento
S_y	Limite de escoamento
$SMYS$	Limite de escoamento mínimo especificado para o material
S_u	Limite último de tração
T_g	Temperatura de transição vítrea
T	Tempo
t	Espessura de parede do duto
t_{rep}	Espessura do reparo
$t_{projeto}$	Espessura nominal do duto
$t_{aço}$	Espessura de parede do duto

$t_{rep,min}$	Espessura mínima requerida de reparo
$t_{rep,c}$	Espessura mínima do reparo na direção circunferencial
$t_{min,a}$	Espessura mínima de reparo requerida no sentido axial
τ	Tensão de cisalhamento entre camadas
σ	Tensão
σ_c	Tensão circunferencial
σ_L	Tensão longitudinal
σ_{ij}	Tensão (Pascal)
ν	Frequência de radiação incidente
ν_f	Fração volumétrica de fibra
ν_m	Fração volumétrica da matriz
ν_v	Fração volumétrica de vazios
V_f	Volume de fibras
V_m	Volume da matriz
V_v	Volume de vazios
λ	Comprimento de onda

A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein