

1 Introdução

O Brasil conta atualmente com aproximadamente 27,500 km de dutos para o transporte de gás, óleo e seus produtos [1]. Nos Estados Unidos a extensão da malha dutoviária é de mais de 2,2 milhões de Km [1], com custos anuais de 7 bilhões de dólares para monitorar, substituir e manter esses ativos. O custo relativo de operação e manutenção é igual a 80% desse valor [2].

Tradicionalmente, trechos de dutos com grandes perdas de espessura metálica causadas por corrosão são substituídos ou reparadas por luvas soldadas para restabelecer sua integridade. Este procedimento gera grande custo já que faz necessária a parada das linhas de produção e transporte ou abaixamento de sua pressão, bem como a extensa utilização de reparos com soldas e consequentes ensaios não destrutivos [3]. Atualmente procura-se o desenvolvimento e aperfeiçoamento de outras opções de reparo que também sejam confiáveis mas que tenham menor custo e que possam ser aplicadas, com segurança, às linhas em uso, sem interromper sua operação.

Uma destas opções envolve o uso de materiais compósitos, que já são amplamente utilizados como sistemas de reparo em dutos retos com perdas de espessura externa [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

A flexibilidade de aplicação de mantas de materiais compósitos a diversas geometrias de dutos não retos e seus componentes, tais como dutos curvados a frio e a quente [11], tubos com uniões em T [12] e dutos com reduções de diâmetro [13] abrem uma nova linha de pesquisa.

Esta linha tem como objetivo a geração de dados experimentais e numéricos que auxiliem na investigação da integridade e eficiência dos reparos destes componentes que possam ter defeitos com perda de espessura. Outro objetivo é o desenvolvimento e a análise de equações e métodos simples, que possam ser usados com confiabilidade na determinação das espessuras dos sistemas de reparos a serem usados.

1.1. Objetivo geral

- Avaliar reparos de materiais compósitos em dutos e componentes com perda de espessura externa.

1.2. Objetivos específicos

- Comparar por meio de diversos testes as eficiências de reparos realizados nos dutos com materiais compósitos, constituídos de mantas de resina epóxi reforçadas por fibra de carbono ou fibra de vidro.
- Simular, mediante o emprego de métodos de elementos finitos, o comportamento mecânico dos espécimes testados.
- Validar, mediante o procedimento usado com o método de elementos finitos, a implementação de equações analíticas para a determinação de espessuras otimizadas dos reparos compósitos.

1.3. Estudos realizados

Publicações recentes apresentam resultados de testes envolvendo componentes de dutos com defeitos e dutos com reparos constituídos por luvas metálicas e com materiais compósitos.

Os parágrafos abaixo relatam algumas destas pesquisas. Outras publicações importantes podem ser acessadas por meio de referências fornecidas nos artigos abaixo mencionados.

Stonehouse et al. [14] realizaram testes de pressão hidrostáticos em dutos tipo Tê com base na norma ASME B16.9. Esta norma trata reforços constituídos de aço soldado com espessuras semelhantes às do tubo nominal. Foram obtidos resultados de pressão de ruptura inferiores ao mínimo estimado mediante a norma ASME B16.9. Os autores atribuíram estes resultados à utilização de aços de menor resistência por parte dos fabricantes.

Uesaka et al. [13] realizaram testes de fadiga a baixo ciclo em dutos tipo Tê, curvados a quente e com redução concêntrica. Os resultados de deformação foram comparados com trabalhos anteriores e simulados mediante elementos finitos.

Timothy et al. [15] realizaram testes de pressão hidrostáticos em dutos tipo Tê com defeitos tipo furo circular. Os espécimes foram reparados com mantas de

resina epóxi reforçadas por fibra de carbono. Por meio de uma equação analítica indicada pela norma ASME PCC2 [16] foi determinada a pressão de ruptura para diferentes espessuras de reparo. Foram obtidos resultados conservadores para a equação analítica proposta por [16] com desvios de 16% a 68%.

Alexander [17] apresenta uma visão geral sobre a implementação de reparos de materiais compósitos em linhas de dutos e ressalta a realização de testes experimentais para condições reais de operação, bem como o papel que desempenha a modelagem por elementos finitos na otimização e projeto de futuros reparos.

Alexander et al. [18] realizaram ensaios de resistência a altas temperaturas em sistemas de reparos constituído por mantas de resina epóxi reforçados por fibra de carbono. Estes sistemas de reparo foram desenvolvidos para trabalhar a altas temperaturas. No estudo, os autores realizaram testes em cupons do sistema de reparo, determinando a tensão de ruptura e variações no módulo de elasticidade em função da temperatura. O estudo finaliza com a realização de um teste de pressão hidrostático, a 120 °C, em um duto reto com perda de espessura externa. O resultado do teste apresenta valores de deformação circunferencial inferiores em relação aos obtidos com outras mantas de fibra de carbono testadas a temperatura ambiente.

Alexander et al. [19] realizaram testes de deflexão e fadiga por ciclos de pressão (36% SMYS) em dutos retos com defeitos de soldagem. Esses espécimes constituídos de tubos API 5L grau 42 e grau 46 foram reparados com diferentes tipos de materiais compósitos e pressurizados. Além disso, foram realizados testes de pressão hidrostáticos em dutos curvados, cujos resultados apresentaram maiores deformações no intradorso, considerando espessuras de paredes iguais. Com os resultados obtidos os autores consideram validado o modelo de elementos finitos usado na investigação.

Fenton et al. [11] realizaram testes de fadiga sob baixo ciclo de tração, em dutos com raios de curvatura curtos previamente pressurizados a 100 psi. Os resultados foram comparados com testes de dutos de raios de curvatura longos realizados em condições similares. Os dutos de raio de curvatura curtos e longos falharam, respectivamente, a 210 ciclos e a 670 ciclos, indicando maior resistência dos dutos com raios de curvaturas longos.

Akula [20] realizou uma simulação de um *riser* fabricado a partir de materiais compósitos. No trabalho foram avaliados os deslocamentos e tensões principais, assim como a falha dos componentes da manta através do critério de resistência de Tsai-Wu.

Duell et al. [21] realizaram testes de pressão hidrostáticos em dutos retos com defeito (perda de espessura externa) e fizeram reparos nos mesmos com mantas de resina epóxi reforçadas com fibra de carbono. No trabalho foram realizados modelos de elementos finitos e seus resultados foram comparados com as pressões de ruptura dos testes experimentais e obtiveram desvios de 3,5%. Após validado o modelo de elementos finitos foram executadas outras simulações com variações geométricas do defeito.

1.4. Materiais compósitos

Os compósitos são materiais conformados em uma escala macroscópica por dois ou mais materiais insolúveis, os quais são unidos de formas e proporções adequadas para compor um novo material com propriedades melhores do que as de seus constituintes. Os compósitos aproveitam as propriedades de cada um deles para obter altas relações resistência - densidade ou rigidez - densidade, entre outras propriedades. São diferenciadas duas fases, a matriz e a fibra, a primeira pode ter ou não alta resistência ou rigidez, a segunda é usualmente resistente e rígida.

Em dutos reparados com mantas de materiais compósitos as fibras aportam resistência e rigidez e suportam as cargas. A matriz cumpre a função de conter as fibras, manter a integridade do compósito e transferir o carregamento entre elas, além de protegê-las do meio externo. A matriz também isola as fibras retardando o crescimento de trincas que podem ser geradas nas fibras.

1.5. Testes de pressão hidrostáticos previamente realizados

Foram aproveitados resultados de testes de pressão hidrostáticos realizados no Centro de Tecnologia em Dutos (CTDUT) pelo professor Ronaldo Vieira [22]. Estes resultados foram utilizados para comparações com os modelos numéricos

utilizados. Os testes de pressão hidrostáticos foram realizados em sete espécimes para cada tipo de componente de duto estudado, onde existiam defeitos tipo perda metálica em todos eles. A Figura 1.1 apresenta os quatro tipos de componentes analisados bem como a posição dos rebaiços em cada componente. As notações R1 e R2 na Figura 1.1 indicam as localizações dos extensômetros de resistência elétrica.

Sobre a posição dos rebaiços foram realizados reparos com mantas de resina epóxi reforçadas por fibras de vidro (ERFV) e fibra de carbono (ERFC).

As propriedades dos compósitos foram determinadas a partir de ensaios de DIC (Metodo de Correlação Digital de Imagem) realizados por Vieira R. [23] e testes de tração uniaxial. Os testes foram realizados com duas mantas dos materiais utilizados. Uma manta composta de 4 tecidos de fibra de carbono e resina epóxi e outra manta composta de 7 tecidos de fibra de vidro e resina epóxi. As mantas foram confeccionadas a partir dos mesmos compósitos utilizados nos testes de pressão hidrostáticos.

Para cada componente foram realizados testes em sete espécimes: três reparados com compósito ERFV, três reparados com compósito ERFC e um sem reparo. Os sete espécimes foram testados sob pressão interna; quatro espécimes foram testados até uma pressão que gerasse uma tensão circunferencial igual à tensão de escoamento nominal específica (SMYS) dos aços que os constituíam na região do tubo e três testados até a ruptura incluindo o espécime sem reparo.

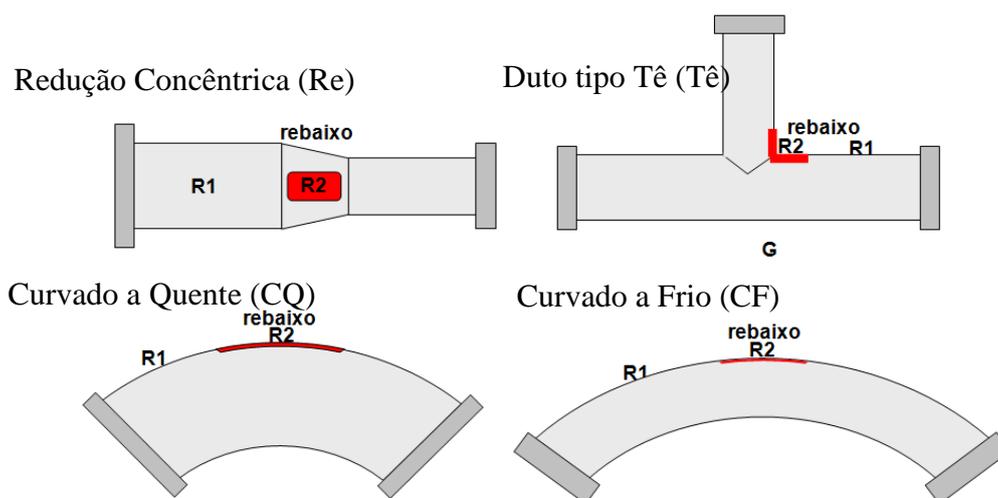


Figura 1.1 - Tipos de dutos analisados [22].

A Tabela 1.1 apresenta o resumo dos testes de pressão hidrostáticos (TPH) realizados previamente a este trabalho onde são especificados os tipos de reparos utilizados ou espécimes sem reparo para cada geometria de componente tubular, enumerados de 1 a 7.

Espécimes		Tipo de reparo	TPH
Re	1	ERFC	Ruptura
	2, 6	ERFC	SMYS
	3	ERFV	Ruptura
	4, 5	ERFV	SMYS
	7	Sem reparo	Ruptura
CQ	1, 4	ERFC	SMYS
	2	ERFC	Ruptura
	3	ERFV	Ruptura
	5, 6	ERFV	SMYS
	7	Sem reparo	Ruptura
CF	1, 2	ERFC	SMYS
	3, 6	ERFV	SMYS
	4	ERFC	Ruptura
	5	Sem reparo	Ruptura
	7	ERFV	Ruptura
Tê	1, 3	ERFV	SMYS
	2	ERFC	Ruptura
	4	Sem reparo	Ruptura
	5,6	ERFC	SMYS
	7	ERFV	Ruptura

Tabela 1.1 - Tipos de reparos e testes de pressão hidrostáticos (TPH) realizados para cada espécime.

1.6. Roteiro da dissertação

Esta dissertação foi dividida em sete capítulos, uma introdução (este), cinco capítulos de desenvolvimento do trabalho e um último capítulo de conclusões. A seguir apresentam-se os tópicos de cada capítulo.

- **Capítulo 2:** São apresentados os fundamentos para avaliação da integridade em dutos, critérios de resistência em dutos e em materiais compósitos.
- **Capítulo 3:** São apresentadas as equações analíticas empregadas para comparações na região elástica e para a determinação das

curvas tensão - deformação, bem como uma equação simples que permita calcular as espessuras de reparos ótimos.

- **Capítulo 4:** É especificada a modelagem numérica e são apresentados os resultados obtidos para cada espécime simulado.
- **Capítulo 5:** É apresentada a abordagem experimental, explicando o procedimento e instrumentação dos testes de pressão hidrostático.
- **Capítulo 6:** São comparados os resultados numéricos e analíticos com os resultados obtidos nos testes experimentais. São determinados os fatores de resistência remanescente. São apresentados os resultados com as equações analíticas proposta e seus resultados são comparados com os resultados obtidos com modelos de elementos finitos.
- **Capítulo 7:** Finalmente, são realizadas as conclusões e sugestões do trabalho.