

## 1.

### Introdução

#### 1.1.

##### Objetivo

Esta tese tem como objetivo analisar e validar modelos que explicam o comportamento de reparos tipo luva em dutos com defeitos caracterizados por perda de espessura. Os reparos tipos luvas estudados são os reparos de material compósito e os novos reparos de camadas metálicas coladas.

#### 1.2.

##### Considerações Iniciais

Com o aumento das necessidades de energia dos mercados, os programas privados e governamentais de ampliação das redes dutoviárias são cada vez mais comuns. O Brasil, embora possua uma malha de dutos relativamente pequena (cerca de 22 mil km) em relação a muitos outros países, tem uma projeção de grande expansão desta malha para os próximos anos. Só a Petrobras e sua empresa de logística e de transporte, Transpetro, deverão investir cerca de 5 bilhões nos próximos cinco anos com a construção de novas linhas dutoviárias visando atender a demanda ocasionada pelas novas descobertas e a expansão do fornecimento de combustíveis [1]. Soma-se a isto o fato de que a maior parte da produção chega às refinarias e às indústrias, através de dutos e tubulações. As interrupções de fluxos nestes dutos podem representar ociosidade nas plantas e acarretar grandes prejuízos econômicos. Devido ao seu alto custo e à sua importância, o esforço para acrescentar vida útil às redes dutoviárias é perfeitamente justificável. No entanto, no que diz respeito às condições de trabalho tal como, por exemplo, a de um ambiente corrosivo, a possibilidade de ser atingido por ferramentas em escavações ocorrem recalques dos apoios, ou movimentação de solos,

etc., os dutos estarão sujeitos a vários tipos de danos, sendo a perda da espessura por corrosão ou erosão o tipo de dano mais comum.

Uma vez detectada uma perda de espessura relevante, procura-se aumentar a vida útil de um duto reparando-se o trecho danificado. Pode-se resumir em três os cenários para o reparo de dutos e tubulações: (i) defeitos de perda de espessura externa (causados por corrosão, ou dano mecânico), (ii) defeitos de perda de espessura interna (causados por corrosão, ou erosão) e, (iii) defeitos com vazamentos. Os métodos de reparos de dutos podem estar agrupados em: corte e substituição, reparo por dupla calha soldada, reparo com luva de material compósito e uso de abraçadeiras. Para reparar os defeitos do primeiro cenário podem ser utilizadas as luvas metálicas ou as luvas de material compósito, nas quais o projeto do dimensionamento de cada reparo torna-se um ponto importante para o seu correto desempenho.

### 1.3.

#### **Trabalhos Anteriores**

Na seqüência, apresenta-se o resumo de algumas publicações para mostrar o panorama das pesquisas relacionadas ao tema de reparos tipo luva, especialmente dos reparos de material compósito e metálicos colados. A sinopse serve como orientação ao trabalho desenvolvido nesta tese e procura dar uma melhor ênfase a respeito deste tema.

#### *1. Referências baseadas em simulações numéricas e/ou desenvolvimento do método dos elementos finitos:*

No artigo da referência [2] são feitas simulações numéricas de dutos reparados com material compósito (carbono/epóxi). Os dutos simulados são de aço AISI 1020 com diâmetro externo de 100 mm, espessura de 2 mm e defeitos longos com uma profundidade de 50% da parede do duto. O artigo menciona a existência de uma espessura mínima necessária para o reparo recuperar sua rigidez local perdida com o desgaste e, por fim, conclui que a espessura mínima do conserto depende diretamente da relação entre os módulos de elasticidade do reparo e do material original do tubo. No caso específico do modelo numérico analisado, a espessura requerida do reparo é de 3,05 mm.

No artigo da referência [3], apresenta-se uma metodologia numérica para o projeto de reparo, quando o mesmo é aplicado numa seção de duto não reta como, por exemplo, nos tes e nas curvas. O método apresentado neste artigo utiliza as deformações como critérios de projeto, no lugar das tensões, mencionando que essas são as mais adequadas para o projeto de reparo nas seções não retas. Os modelos numéricos são validados com resultados experimentais que utilizam extensômetros elétricos para a medição das deformações. Também são feitas recomendações sobre as margens apropriadas para projeto.

Na dissertação da referência [4], apresenta-se o desenvolvimento de um modelo de elasticidade plana, que utiliza a metodologia de elementos finitos e procura determinar as tensões em dutos reparados com remendos colados. Estes podem ser de material compósito (anisotrópico), ou metálico (isotrópico). Conclusões deste trabalho assinalam primeiramente que: para o reparo de trincas, a forma e a espessura do remendo alteram seu rendimento; em segundo lugar que: a forma do remendo não tem influência no rendimento do reparo.

## *2. Referências baseadas no desenvolvimento de modelos analíticos:*

Na referência [5] apresenta-se um modelo analítico para o cálculo das tensões máximas atuantes no duto sem defeito, no duto com defeito e no duto reparado. Apresentam-se diferentes condições de carregamento, tais como: carregamento do solo, do tráfico e da pressão interna. Com este modelo demonstra-se que o reparo com melhor desempenho na resistência da pressão interna é o reparo de fibra de carbono, em comparação aos reparos que utilizam fibra de aramida, ou fibra de vidro. Porém menciona-se que, o contato da fibra de carbono com o aço poderia provocar corrosão. Contudo, estudos anteriores não demonstraram qualquer degradação visível. De qualquer forma, este artigo recomenda que antes da aplicação do reparo, as paredes do duto devem estar livres de corrosão e revestidas de alguma forma para evitar o contato do material compósito com o aço.

No artigo da referência [6] demonstra-se um modelo analítico para o cálculo das tensões em dutos construídos com material compósito, que são analisados sob o escopo de materiais anisotrópicos. Esta formulação apresentada pode ser útil para o projeto e

para a prevenção de falhas em dutos de material compósito, quando carregados com pressão interna.

### 3. Referências baseadas em ensaios e/ou testes experimentais:

O artigo da referência [7] baseia-se na análise do comportamento mecânico dos reparos de material compósito, mais especificamente dos reparos fornecidos por Strongback. Foram testados 4 tubos em escala real: 2 reparados, um com defeito externo e outro com defeito interno. Foram apresentadas as deformações obtidas mediante as rosetas extensométricas instaladas no defeito, fora do defeito e sobre o reparo (na janela do defeito e a 90° do defeito). Os testes mostraram que os reparos efetuados por Strongback foram efetivos para restaurar a resistência dos tubos até a pressão de teste hidrostático originado em 138% da pressão de projeto de um tubo sem defeito. O tubo com defeito interno rompeu após 33 minutos naquela pressão.

Na referência [8] encontram-se testes de envelhecimento de quatro tipos de compósito reforçados com fibra de vidro (CRFV): um produzido em laboratório, composto por resina tipo epóxi com fibra de vidro e, três comerciais: (i) resina tipo epóxi, filler<sup>1</sup>, agente de cura, fibra de vidro em tecido e manta e resina poliéster isoftálica; (ii) compósito processado por pultrusão<sup>2</sup>, fita adesiva de dupla face, resina base, filler, ativador do adesivo, ativador do filler; (iii) tecido de fibra de vidro impregnado em resina tipo epóxi, filler e agente de cura do filler. Também foram testadas técnicas para inspeção de anomalias nos reparos de material compósito. Os resultados experimentais mostraram que, nas condições de ensaio estabelecidas, o compósito preparado em laboratório apresentou maior tenacidade e suas propriedades de tração não foram significativamente alteradas, após tratamento de envelhecimento com submersão em petróleo. O material (ii) foi o mais rígido e suas propriedades mecânicas foram as mais alteradas, após a imersão no fluido. Dentre as técnicas de inspeção de falhas de dutos reparados existentes, a análise por raios-X foi a que apresentou a melhor resolução na detecção dos defeitos internos.

---

<sup>1</sup> Material misturado na resina com o propósito obter características desejadas na resina depois da cura

<sup>2</sup> Processo de fabricação de material compósito que consiste em “puxar” as fibras embebidas na resina matriz através de uma fiação ou molde. O aquecimento do molde, que tem a forma da seção transversal do perfil desejado, provoca cura da resina durante a passagem no seu interior

Na referência [9], caracterizam-se três materiais compósitos usados no reparo de dutos na indústria petroquímica. Os três materiais compósitos deste trabalho apresentam a seguinte configuração: (i) um constituído de tecido de fibra de vidro e matriz polimérica produzido por laminação manual; (ii) um híbrido constituído de fibras alinhadas e manta de fibra de vidro em uma matriz também polimérica, o qual foi produzido por laminação manual e (iii) um outro, ainda, produzido pelo método de pultrusão, também, formado por matriz polimérica e reforçado por fibras contínuas, alinhadas na direção da pultrusão (processo explicado no rodapé número 2 da pagina anterior). Os resultados mostraram que o material compósito (i), produzido por uma empresa nacional, apresentou maior limite de resistência à ruptura sob tração, em comparação com os outros dois materiais importados. O material compósito (iii) apresentou o maior módulo de elasticidade. O material compósito (ii) apresentou a maior deformação a ruptura.

O objetivo da tese da referência [10] é desenvolver uma matriz polimérica com resina viniléster para compósito direcionado ao reforço de dutos de aço, o qual foi produzido através da técnica de enrolamento filamentar. Para isto são avaliadas as propriedades mecânicas dos diferentes tipos de resinas antes e depois de haverem experimentado processos de envelhecimento por imersão em água temperatura ambiente e em água a 60°C por períodos de 36 e 60 dias.

No artigo da referência [11] tem-se o objetivo de comparar mediante testes experimentais os seguintes métodos de reparos: por dupla calha soldada tipo A, por mangas preenchidas com epóxi, por material compósito e por deposição de solda. Os tubos utilizados nos espécimes tubulares são tubos API 5L X65, em escala real (diâmetro de 762mm e espessura de parede de 17.5mm), com defeitos longos usinados com uma profundidade de 80% da espessura da parede (com exceção dos defeitos reparados com deposição de solda, os quais tiveram uma profundidade 50% e 66%). Os testes mostraram que todos os tipos de reparos testados tiveram um fator de segurança acima de 2.5, com relação à MAOP (MAOP calculada segundo a ASME B31.8 [59]).

*4. Referências baseadas em testes experimentais com comparações de simulações numéricas:*

Na referência [12] apresentam-se os resultados de simulações numéricas e testes experimentais em escala real dos dutos reparados com material compósito. O artigo tem o objetivo de analisar a aplicação deste tipo de reparo em tubulações offshore e risers, dado que nestas linhas as cargas de dobramento, pressões internas e externas devem ser consideradas. Um novo design de reparo de fibra de carbono foi apresentado. Os resultados mostraram-se satisfatórios, mas indica que novas investigações devem ser realizadas para garantir a utilização deste tipo de reparo em aplicações offshore.

No artigo da referência [13] são apresentados os resultados de testes experimentais de um duto com defeito externo, reparado com material compósito. São utilizados extensômetros de resistência elétrica próprios para grandes deformações, para leituras em pontos sob e sobre o material do reparo. Um modelo de elementos finitos também é desenvolvido para comparação dos resultados. Este artigo conclui que o efeito de reforço do reparo é evidenciado, mas seu principal efeito ocorre no instante em que a parede de aço do defeito inicia seu escoamento. A partir deste instante, o reparo passa a trabalhar efetivamente. O artigo conclui que é válido realizar-se o cálculo da espessura de reforço considerando que a parede de aço suportará a pressão até seu limite de escoamento, ou ruptura.

##### *5. Referências baseadas em testes experimentais a partir de comparações de simulações numéricas e analíticas:*

Nesta dissertação, a referência [14], tem o objetivo de validar uma nova técnica de reparo, que utiliza chapas metálicas coladas na região do duto com defeito. Para isto realizam-se simulações numéricas e testes experimentais em tubos com escala reduzida e, também, apresenta-se uma metodologia para o cálculo das tensões no duto (região com defeito), no adesivo (que preenche o defeito) e no reparo. Os resultados mostraram que esta nova técnica de reparo consegue devolver a integridade estrutural do duto com defeito que têm até 80% de profundidade. As previsões numéricas e analíticas comparam-se satisfatoriamente com os resultados experimentais.

No artigo da referência [15] desenvolvem-se simulações numéricas de dutos reparados com material compósito (com fibra de carbono), com defeitos de diferentes larguras (direção circunferencial), cujos resultados foram comparados com os testes experimentais em escala real. O comprimento e a profundidade dos defeitos

mantiveram-se constantes. Os resultados demonstraram que é boa a semelhança dos resultados numéricos com os experimentais. Mostraram, também, que a variação da largura do defeito pouco influi na pressão de falha. A espessura determinada numericamente foi comparada com a espessura calculada, segundo a ASME PCC-2 [37]. A mesma indicou que a profundidade avaliada a partir dessa norma mostrou-se conservadora (30% a mais do que o requerido numericamente). O artigo recomenda que para o projeto de reparos, é importante ter presente a grande incerteza no cálculo da resistência do compósito, como também a fluência que experimenta o compósito quando se mistura tempo, carregamento e temperatura.

O artigo da referência [16] baseia-se nos resultados numéricos e experimentais da referência [14]. Este artigo apresenta um método analítico simples para cálculo da espessura e o número de camadas de reparo necessárias para devolver a integridade estrutural ao duto. A eficiência deste método é comprovada quando comparado com os resultados numéricos e experimentais da referência [14] e indica que sua aplicação em dutos ativos (dutos operando) ainda deve ser estudada.

#### *6. Normas e outros estudos*

Nos últimos anos vários trabalhos serviram para a geração das recentemente desenvolvidas ISO/TS 24817 [18], norma exclusiva para reparos de material compósito, e ASME PCC-2 [37], norma para vários tipos de reparos, sendo a seção 4 referente a reparos de material compósito. Estas normas incluem o projeto, fabricação, avaliação e testes necessários para estes tipos de reparo. Ambas apresentam equações simples para o cálculo da espessura de reparo. Na seção 2.2 de esta tese se descrevem estas duas referências. No livro da referência [22], encontram-se recomendações práticas de seleção e utilização de vários tipos de reparos.

#### **1.4.**

#### **Motivação**

Tendo como base as pesquisas bibliográficas, pode-se dizer que os trabalhos citados estiveram orientados para determinar o comportamento de um duto reparado utilizando técnicas numéricas e/ou experimentais. Outros apresentam equações simples

para o cálculo da espessura de reparo tentando garantir a segurança na operação, mas não mostraram o comportamento do reparo. Acredita-se que esta seja uma desvantagem considerável, uma vez que, pequenas variações nas propriedades mecânicas e/ou nas propriedades geométricas do sistema do duto-reparo acarretam variações no seu comportamento.

Por esta razão, o objetivo principal desta tese é analisar e validar modelos que explicam o comportamento de reparos tipo luva em dutos com defeitos caracterizados por perda de espessura. Os reparos tipos luvas estudados são os reparos de material compósito e os novos reparos de camadas metálicas coladas.

## 1.5.

### Roteiro da Tese

Esta tese foi dividida em seis capítulos: um de introdução, quatro de desenvolvimento e um de conclusão. A seguir estão listados os tópicos principais de cada capítulo.

- Capítulo 2: apresenta-se nele um resumo dos principais métodos de reparo e dos principais modelos analíticos para o cálculo da espessura de reparo. O mesmo também oferece conceitos básicos da integridade estrutural na qual se sustenta esta tese.
- Capítulo 3: descreve-se, detalhadamente, a modelagem numérica apresentada.
- Capítulo 4: demonstra-se o desenvolvimento dos modelos analíticos.
- Capítulo 5: propõem-se dois estudos de caso e um exemplo didático de projeto de reparo em que se utiliza a metodologia apresentada no capítulo 4.
- Capítulo 6: apresentam-se as conclusões do trabalho.