7 Conclusões e sugestões

Neste trabalho foram avaliados componentes de dutos com perdas de espessuras metálicas em suas superfícies externas e reparados com materiais compósitos. Os materiais compósitos usados neste trabalho consistiram de mantas de resina epóxi reforçadas por fibra de vidro ou por fibra de carbono. Modelos de elementos finitos foram gerados para determinar as deformações e tensões atuantes nos componentes de dutos e nos reparos. Também foram determinadas numericamente as pressões de ruptura de cada tipo de componente reparado. Os modelos de elementos finitos foram validados a partir de confrontações de seus resultados com os resultados de deformações e pressões de ruptura alcançados com testes experimentais (TPH) previamente realizados e disponíveis para comparações. Também foram desenvolvidas equações analíticas simples para determinar as espessuras de reparos dos espécimes estudados. Os resultados obtidos com estas equações analíticas foram comparados com os resultados obtidos dos modelos de elementos finitos e com resultados de equações analíticas disponíveis em normas específicas para reparos com materiais compósitos.

As conclusões específicas para cada tipo de espécime estudado são apresentadas a seguir:

7.1. Espécimes com redução concêntrica

- O modelo de elementos finitos representou satisfatoriamente os resultados experimentais (ERE) para deformações atuantes tanto nos tubos como nos reparos. As simulações realizadas para determinar as pressões de ruptura nos componentes estudados foram satisfatoriamente comparadas com os resultados obtidos em testes de pressão hidrostática, apresentado desvios entre 3,5% e 4,7% para três componentes analisados.

- As espessuras de reparo determinadas por meio de uma equação analítica simples foram validadas através de comparações com resultados determinados com a modelagem por elementos finitos. Portanto, uma equação analítica simples pode ser usada na determinação de espessuras de reparos ótimos em dutos com redução concêntrica e perda de espessura externa utilizando mantas de resina epóxi reforçada por fibra de carbono ou fibra de vidro.

7.2.Espécimes tipo Tê

- O modelo de elementos finitos representou satisfatoriamente os resultados experimentais (ERE) para deformações atuantes nos tubos fora da região dos defeitos.
- Os resultados das deformações experimentais, apresentaram a direção longitudinal como a deformação principal (ϵ_1) no raio externo do reparo do compósito epóxi - fibra de vidro, ERFV. Por meio do modelo de elementos finitos foi possível determinar que, embora a deformação circunferencial fosse negativa na superfície externa do reparo, na superfície interna do reparo as deformações circunferenciais foram positivas e podem ser as causadoras de ruptura nos reparos.
- A previsão de pressões de ruptura pelo método de elementos finitos foi considerada satisfatória apresentando desvios entre 0,4% e 3,5% nos espécimes estudados.
- A equação analítica para previsão de espessura de reparo foi validada pelo modelo de elementos finitos para o reparo de compósito epóxi - fibra de carbono ERFC obtendo-se resultados satisfatórios. Para o reparo de compósito epóxi - fibra de vidro ERFV o modelo de elementos finitos apresentou diferenças aceitáveis para reparos em espécimes com perdas de espessura metálica menores que 40%.

7.3.Espécimes curvados a frio

- Durante a comparação entre resultados numéricos e experimentais foi determinado que estes dutos apresentavam ovalizações. Foram realizadas diferentes simulações com diversos graus de ovalização, obtendo-se resultados satisfatórios para as determinações em regiões dos tubos longe dos defeitos e resultados aceitáveis sobre os reparos.
- As simulações realizadas para determinar as pressões de ruptura foram semelhantes em relação aos resultados obtidos nos testes de pressão hidrostático, apresentando desvios de 0,2% a 3,2% nos espécimes estudados.
- A equação analítica implementada foi validada pelo modelo de elementos finitos para o reparo ERFC obtendo-se resultados satisfatórios, enquanto o reparo de ERFV apresentou desvios de 60% para perdas de espessuras de 80%, e desvios de 35% para perdas de espessura de 40%.

7.4.Espécimes curvados a quente

- O modelo de elementos finitos representou satisfatoriamente os resultados experimentais (ERE) para deformações atuantes tanto nos tubos quanto nos reparos.
- As simulações realizadas para determinar as pressões de ruptura foram semelhantes aos resultados obtidos nos testes de pressão hidrostáticos, apresentando desvios de 0,6% a 3,8% nos espécimes estudados. Embora os resultados tenham sido muito bons, o mecanismo de ruptura em um dos espécimes (CQ3) poderia ser diferente; ruptura do reparo, na superfície interna no modelo de elementos finitos e ruptura na região defeito, no teste de pressão hidrostático. Esta diferença poderia ser devida a uma falta de aderência entre os três materiais (aço -epóx i- reparo) que não é considerado no modelo numérico.
- A equação analítica implementada foi validada pelo modelo de elementos finitos para o reparo ERFC obtendo-se resultados satisfatórios, enquanto que o reparo de ERFV apresentou desvios de 40% para perdas de espessuras de 80%, e resultados satisfatórios para perdas de espessura menores que 40%.

A continuação se apresenta as conclusões globais do trabalho:

Embora todos os dutos testados hidrostaticamente foram denominados como API5L grau B. Após avaliar os resultados dos testes, foram encontradas diferenças nos espécimes curvados a frio e nos espécimes curvados a quente. O espécime CF4 apresentou pouca deformação plástica antes da ruptura (Figura 6.36). Os espécimes CQ apresentaram propriedades mecânicas superiores que os outros espécimes testados. Esta mudança de propriedades usualmente é devido a o fato de usar denominações de aços maiores a fim de obter as propriedades requeridas após o curvamento.

A equação analítica simples utilizada na determinação de espessuras de reparo foi validada para todos os espécimes estudados e considerada satisfatória para os reparos de compósito ERFV, enquanto que a equação analítica para os reparos de compósito ERFV apresentou resultados menos conservadores. Estas diferenças podem ser atribuídas ao fato de os compósitos ERFV precisar maiores espessuras de reparo. A equação analítica empregada, considera as deformações no reparo e defeito semelhantes, para valores de espessura grandes a hipótese inicial não é cumprida. A norma ISO 24817 [5] recomenda não utilizar espessuras de reparos maiores a $D/6$ quando seus valores são calculados por meio de equações analíticas.

7.5.Sugestões para trabalhos futuros

- Medir a ovalização em dutos curvados antes de realizar testes de pressão hidrostáticos.
- Realizar ensaios de pressão hidrostático em componentes de dutos com perda de espessura externa e reparados com materiais compósitos, através do uso de EREs sobre a superfície metálica na região do defeito e ao longo da espessura de reparo, para que seja possível determinar a variação das deformações ao longo da espessura do reparo.