

## 7

### Conclusões, Limitações e Sugestões

#### 7.1

##### Conclusões

Neste trabalho comprova-se a eficácia da nova técnica de reparo usando multicamadas metálicas coladas para dutos com perda externa de espessura. Foi mostrado que com um dimensionamento correto, a região reparada consegue suportar pressões superiores às suportadas por um duto sem defeito.

A técnica ainda permite limitar as deformações que se apresentam na região do defeito, mesmo quando se trabalha no regime elástico, devido ao alto módulo de elasticidade das camadas metálicas, que devolvem a integridade estrutural do duto danificado.

Às vantagens apresentadas do novo método somam-se, ainda, uma segura e fácil aplicação pela não necessidade de soldagem e seu menor custo quando comparada aos compostos atualmente utilizados.

Neste trabalho foram realizados: oito testes com espécimes reduzidos; a modelagem analítica do reparo; e a modelagem numérica.

Na *abordagem experimental* foram testados oito espécimes tubulares, cinco dos quais foram reparados utilizando multicamadas metálicas coladas. Nestes foram usinados defeitos para simular perda de espessura. Vale dizer que em todos os espécimes reparados o defeito tem a mesma geometria, mas muda-se o número

de camadas e o material usado nos reparos. Com a instrumentação dos espécimes ensaiados e a determinação experimental de variáveis tais como, deformações, pressões e variações volumétricas, conseguiu-se comparar resultados e otimizar-se o método de reparo.

Dos cinco espécimes reparados, dois romperam fora do reparo. Um utilizou quatro camadas de aço de baixo carbono no reparo, e o outro utilizou duas camadas de aço inoxidável no reparo (devido a sua alta resistência). O espécime com duas camadas apresentou deformações plásticas no defeito sob menores pressões ( $9.1\text{MPa} < 12.4\text{MPa}$ ), devido a sua menor rigidez, resultado de sua menor espessura, considerando-se ambas chapas com módulos de elasticidade similares.

Outros três espécimes reparados romperam na região do defeito, estes tinham uma, duas e três camadas de aço de baixo carbono no reparo e as pressões de ruptura foram de 8.7, 13.2, 18.3 MPa, respectivamente. A ruptura ocorreu quando a região do defeito atingiu seu limite de deformação plástica originando uma fissura por onde sai o fluido pressurizado, o que origina um desprendimento localizado na interface duto-adesivo, que propaga-se até alcançar o extremo por onde acontece o vazamento. No caso do duto de três camadas, a falha poderia ter acontecido no reparo ou fora do reparo, já que a pressão que este suporta é similar às pressões de ruptura de um duto sem defeito.

As falhas por desprendimento das camadas metálicas devido a uma possível falha no adesivo é pouco provável em adesivos estruturais, devido à grande área sobreposta. Antes do desprendimento acontecer, o defeito rompe, atingindo seu limite de deformação plástica, ou, o duto rompe fora do reparo.

Nos espécimes que rompem fora do reparo, a ruptura acontece no extremo com terminação abrupta.

Na *modelagem analítica* apresenta-se uma metodologia simples para obter a tensão atuante no defeito e no reparo, para uma determinada pressão interna, além de determinar as pressões que ocasionaram a ruptura e o escoamento em cada

componente do conjunto tubo-reparo, mediante o qual, pode-se dimensionar apropriadamente a espessura do reparo. Ao conhecer o comportamento das tensões em relação à pressão, pode-se otimizar o projeto de reparo mudando as propriedades dos materiais usados (principalmente das camadas metálicas), ou diminuindo ou aumentando sua espessura. Com este fim apresenta-se um programa simples que automatiza a utilização das equações desenvolvidas.

Esta modelagem possibilitou prever com erro máximo de 9.4% as pressões que originam a ruptura e o escoamento do defeito nos espécimes testados. Também pôde-se observar que, o espécime reparado com quatro camadas de aço de baixo carbono, tem melhor desempenho que o espécime reparado com duas camadas de aço inoxidável. Aplicando-se a ambos uma pressão igual à pressão de operação num duto novo (10.19MPa segundo a norma B31.4), o reparo de quatro camadas de aço de baixo carbono não tinha atingido seu limite de escoamento na região do defeito ( $217.1\text{MPa} < 262.2\text{MPa}$ ), o que não ocorre com o reparo com duas camadas de aço inoxidável que trabalha plasticamente à mesma pressão ( $266.2\text{MPa} > 262.2\text{MPa}$ ). Este comportamento pode ser explicado através de uma das hipóteses feitas nesta modelagem, onde se tem um módulo de elasticidade ponderado para o adesivo (no defeito) e para as camadas metálicas. Esta ponderação depende da espessura de cada um e de seu módulo de elasticidade. Como os dois tipos de chapas utilizadas têm módulos de elasticidade semelhantes, o reparo que tenha maior espessura, vai ter módulo de elasticidade ponderado maior e também rigidez maior.

A *modelagem numérica* teve a finalidade de compreender e otimizar o comportamento do duto reparado e propor modelos numéricos que melhor o representem. Foi utilizado o método dos elementos finitos como ferramenta de simulação. Foram criados modelos numéricos distintos que agrupam-se em modelos de deformação plana, axissimétricos e modelos 3D.

Na análise dos modelos desenvolvidos se observa que:

- A modelagem que inclui grandes deslocamentos pode trabalhar com a curva real tensão vs deformação do material, enquanto a modelagem que

não considera grandes deslocamentos pode trabalhar com a curva de engenharia do material. No caso de um duto reparado, pode-se trabalhar com uma modelagem que não inclua grandes deslocamentos, já que o reparo limita a estricção que pode acontecer no defeito.

- Os comportamentos nas modelagens de deformação plana e nas modelagens 3D são similares, ambos atingem seu limite de escoamento praticamente sob a mesma pressão.
- A opção pela utilização de curvas bilineares ou multilíneas nas propriedades do material, tem importância quando se quer estudar o que acontece na região de transição elasto-plástica, onde é recomendável trabalhar com curvas multilíneas do material. Na ruptura, não se apresentaram diferenças relevantes.

Principais resultados obtidos numericamente:

- Conseguiu-se obter com erro máximo de 9.6% as pressões que originam a ruptura e o escoamento do defeito nos espécimes testados.
- Determinou-se um comportamento característico num duto reparado com multicamadas metálicas coladas.
- A influência das distintas geometrias transversais do defeito, com uma mesma profundidade é mínima. Os comportamentos apresentam uma pequena discordância no regime elástico, mas os valores das tensões convergem quase a uma mesma pressão no seu limite de escoamento, a partir do qual os modelos têm valores similares da pressão de ruptura.
- Determinou-se que pode-se utilizar um modelo simplificado que considere uma só camada metálica, com espessura equivalente à soma das camadas metálicas realmente usadas, e sem junção, para o estudo das tensões que se apresentam na região do defeito.
- O efeito da espessura de cada chapa metálica no reparo, pode ser considerado desprezível, segundo as tensões apresentadas no defeito.
- O efeito das tensões cisalhantes máximas no adesivo se restringe aos extremos de cada camada, perto das junções, a qual diminui

consideravelmente na direção circunferencial, assim não influenciando na resistência total do adesivo.

- Observou-se que a utilização de terminações escalonadas nos extremos do reparo pode ser mais conveniente que uma terminação abrupta, já que apresenta melhor distribuição das tensões e menor deformação circunferencial máxima.

## 7.2

### Limitações e Sugestões

Uma das principais limitações da técnica de reparo proposta é o tempo de aplicação do reparo, devido ao tempo de cura do adesivo para cada camada utilizada. No apêndice E apresenta-se uma variante desta técnica de reparo que solucionaria esta limitação, reduzindo o tempo total de aplicação ao tempo de cura de uma só camada.

Apresenta-se no Apêndice D uma metodologia para o cálculo das tensões a partir das deformações medidas experimentalmente num estado multiaxial, cuja validade deve ser testada com mais resultados experimentais.

Sugere-se na parte experimental o uso de extensômetros de resistência elétrica que permitam a leitura de grandes deformações plásticas. Assim como obter curvas das propriedades do material com a maior exatidão possível, o que algumas vezes é difícil, devido à precisão requerida dos equipamentos nas leituras das pequenas deformações elásticas, onde um pequeno erro na sua leitura representa um erro considerável na tensão.

Sugere-se um estudo mais amplo das propriedades do adesivo para esta aplicação, sobretudo a temperaturas altas para assim descartar possíveis efeitos de fluência do adesivo.