

7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1.

Conclusões

O presente trabalho analisou o impacto na integridade estrutural de uma moessa simples contida em espécimes tubulares de parede fina. As dimensões dos espécimes foram próximas das dimensões dos dutos usados para transporte de óleo e de gás. A moessa foi avaliada desde sua criação, e até sua recuperação elástica (após a remoção do indentador), sob condições de carregamento estático e dinâmico. A avaliação sob carregamento estático verificou a possibilidade de falha por ruptura. Sob carregamento dinâmico determinou-se a possibilidade de falha por fadiga. A abordagem do problema fundamentou-se na análise de dados experimentais, dados obtidos de modelagem numérica por elementos finitos e nas comparações dos seus resultados com os modelos e/ou procedimentos teóricos disponíveis na literatura.

7.1.1.

Criação de Mossas

As curvas de indentação experimental e numérica para uma moessa simples com profundidade máxima de 15% foram reproduzidas satisfatoriamente pelos modelos analíticos disponíveis na literatura. Embora as forças de indentação fossem levemente maiores nos modelos analíticos, o comportamento plástico dos testes foi bem reproduzido pelo modelo de Brooker.

O processo de indentação foi modelado satisfatoriamente mediante análise por elementos finitos. Na região plástica o material modelado numericamente apresentou maior rigidez e, conseqüentemente, quando o indentador foi removido, a recuperação elástica foi menor do que a experimental.

Comparando a recuperação elástica das mossas transversais com 15% e 25% de profundidade máxima e a longitudinal com 15% de profundidade máxima, comprovou-se que para os tipos de mocha avaliados sua geometria não afeta significativamente a recuperação elástica.

7.1.2.

Avaliação da Ruptura Estática

A análise experimental e numérica da ruptura estática demonstrou que mossas com 15% e 25% de profundidade máxima não afetam a integridade estrutural dos espécimes tubulares. As mossas avaliadas falharam com pressões iguais às obtidas nos testes de dutos sem defeitos (21MPa). Este resultado não foi corroborado pelos códigos e procedimentos aplicáveis para a aceitação de mossas sob carregamento estático. A diferença obedece ao grau de conservadorismo implícito nos códigos de projeto. Os resultados dessa avaliação são detalhados a seguir:

- Os códigos de projeto aplicados para aceitação/rejeição de mossas baseados na sua profundidade, consideraram as mossas avaliadas como não aceitas.
- As mossas também foram rejeitadas considerando as deformações na parede interna e externa da região danificada. As deformações dos resultados do modelo de elementos finitos e as calculadas conforme a norma ASME B31.8-2003 [23] excederam o valor limite de aceitação.

- Quando aplicada a Seção 8 da RP API 579-2000 [43], as mossas não foram aceitas nos níveis 1 e 2, já que os fatores de resistência remanescente (*RSF*) longitudinal e circunferencial calculados foram menores do que o fator admissível.

7.1.3.

Avaliação de Fadiga

A análise por elementos finitos sob carregamento variável, com pressão máxima de 10,5MPa ($F=0,5$), 15,6MPa ($F=0,72$) e 17,3MPa ($F=0,8$) e pressão mínima nula, para uma profundidade máxima da mocha de 15%, demonstrou que uma vez a mocha se estabilize (no máximo três ciclos de pressão segundo o modelo de elementos finitos) a variação das tensões nos ciclos posteriores é totalmente elástica. Sob estas condições e usando a história de tensões no ciclo estabilizado, a aplicação do método elástico SN para previsão de vidas de iniciação de trincas é apropriada.

A implementação do método SN a partir das tensões de Von Mises numéricas requer de um ajuste de sinal nos valores das tensões. No trabalho foi estabelecido um critério para este fim, demonstrando que a tensão corrigida seguiu a mesma tendência das tensões circunferenciais e longitudinais. Outros critérios podem ser aplicados, sempre que as tensões corrigidas reproduzam a física do problema. Também foram calculadas vidas à fadiga usando as tensões circunferenciais com resultados substantivamente diferentes, as diferenças são justificadas pelas tensões longitudinais altas em certos locais da mocha.

O fator de concentração calculado com as tensões de Von Mises varia em função da pressão, conforme às variações da profundidade da mocha. O valor da literatura mais próximo foi indicado por [26] para tubos com restrição axial, principalmente com valores de pressão baixas. A diferença entre os fatores teóricos e os fatores calculados com as tensões de Von Mises corrigidas é maior sob pressões altas.

A integridade estrutural de dutos com mossas, considerando fadiga, foi comprometida. Os resultados da avaliação de fadiga de mossas com profundidade máxima de 15%, utilizando tensões de Von Mises corrigidas, deu como resultado vidas de entre $3E2$ e $1E3$ ciclos para as pressões avaliadas. Uma vida de $1E2$ ciclos equivale em linhas de transporte de óleo a menos de dois anos de operação. Para linhas de transporte de gás equivale a 25 anos. Já uma vida de $1E3$ ciclos, equivale a cinco anos, em linhas de transporte de óleo e oito décadas, em linhas de transporte de gás. As vidas foram menores no nó 5269 externo, localizado na periferia da mossa, e no nó 5266 interno, posicionado no ponto de maior profundidade. Ao serem considerados os efeitos das tensões médias na fadiga, as vidas na região mais profunda da mossa foram beneficiadas (nó 5266), enquanto que na periferia foram diminuídas. As vidas calculadas por Goodman foram mais conservadoras do que as vidas calculadas por Gerber.

As vidas calculadas com curvas SN tipicamente usadas em dutos foram bastante dispersas entre si. O número de ciclos para iniciar uma trinca varia entre 100 e $4E4$ ciclos. Neste intervalo amplo estão contidos os valores de ciclos para iniciação de trincas calculadas para todos os casos de carregamento estudados. As melhores aproximações foram obtidas para a API Curva X' e [26].

Aplicando o procedimento do PDAM foi obtida uma vida à fadiga de 21 ciclos, valor muito conservador, se comparado com as outras referências da literatura e os resultados desta análise. Este método foi desenvolvido considerando resultados experimentais de mossas criadas com pressão que apresentam maior recuperação elástica do que mossas criadas sem pressão.

O método proposto para o cálculo das tensões máxima e mínima a partir do fator de concentração de tensão, quando desconhecido o histórico de tensões-deformações apresentou vidas muito próximas daquelas calculadas pelo método SN tradicional.

7.2.

Recomendações

Recomenda-se aprimorar o modelo numérico modificando a condição de contato com o solo. O solo pode ser modelado com elementos de contato rígidos da mesma forma que o indentador. A comparação dos resultados com os obtidos no presente trabalho permitirá verificação do efeito de tal condição de contorno nas tensões e deformações da estrutura.

Recomenda-se efetuar testes de fadiga para verificar as propriedades cíclicas do material usadas e os valores de ciclos para iniciação de trincas, calculados pelos métodos SN e ϵ N.

Ao aplicar os procedimentos da literatura para a avaliação de mossa, cuidados devem ser tomados na aplicabilidade de tais procedimentos e nos resultados que deles sejam derivados.

Os fatores de concentração de tensão devem ser estimados sempre considerando a natureza tractiva / compressiva da tensão de Von Mises que esteja sendo usada. Em caso de não ser possível estabelecê-la, deve-se usar a tensão circunferencial, longitudinal ou a maior tensão principal.

Se desconhecidas as tensões atuantes na região mais crítica da mossa, os fatores de concentração de tensão também podem ser calculados a partir das dimensões da mossa, mediante expressões disponíveis na literatura. Porém, cuidados devem ser tomados no seu uso na previsão de vidas à fadiga, já que este fator varia com a pressão.

Estender a avaliação numérica desenvolvida no trabalho mediante o uso do módulo de fadiga do ANSYS ou de qualquer outro programa equivalente para previsão de número de ciclos.

Aprofundar na avaliação de fadiga multiaxial usando os dados até aqui obtidos e verificando o seu efeito na iniciação de trincas.