

6

CONCLUSÕES

Realizado rotineiramente na construção e montagem de dutos o curvamento a frio de campo, tem apresentado problemas de enrugamento no tubo, descontinuidade geométrica que aparece na região compressiva da curva, devido à utilização de novos materiais com alta resistência mecânica e alta relação D/t .

A presente dissertação apresentou uma revisão da literatura sobre enrugamentos em dutos, descreveu o método de funcionamento do processo de curvamento a frio ou de campo, os possíveis modos de falha durante o curvamento, algumas considerações sobre a formação do enrugamento e apresentou o conteúdo de diversos códigos e normas, nacionais e internacionais, sobre a possibilidade de aceitação de enrugamentos em dutos após o curvamento dos tubos.

A dissertação realizou, através de métodos numéricos, a simulação do processo de curvamento de dutos API 5L X70 de diferentes relações diâmetro-espessura (D/t). Foram propostos 6 casos, com relação D/t variando entre 20 e 100, para serem avaliados quanto a formação do enrugamento e resistência à pressão interna, acompanhamento da geometria do enrugamento formado e cálculo de vida em fadiga do tubo que apresentou enrugamento.

Após as etapas descritas, foi realizada uma avaliação sobre a permanência do tubo que apresenta enrugamento na operação do duto.

6.1

MODELO DE ENRUGAMENTO

A utilização do método de elementos finitos mostrou-se adequada para formação do enrugamento durante a simulação de um curvamento a frio por meio de um deslocamento imposto, pois foi possível observar a formação do enrugamento e avaliar sua integridade quanto à vida em fadiga. Foi utilizado o *software* Abaqus[®] para realizar a modelagem e aplicação do método de elementos finitos.

Através do modelo de FEM descrito na seção 4.3 foi possível simular o curvamento do tubo para diferentes relações D/t e avaliar a geometria do enrugamento formado.

Para os casos propostos, o Caso I de relação D/t igual a 20 não apresentou a formação do enrugamento.

O trabalho propôs, de forma a prevenir a formação do enrugamento durante o curvamento a frio, ângulos limites para diferentes relações D/t para os quais o enrugamento não irá ocorrer durante o processo de curvamento, apresentados na Tabela 16, seção 5.1.

A geometria do enrugamento formado foi avaliada e parâmetros como altura, extensão e extensão circunferencial foram extraídos de cada um dos casos em que houve formação do enrugamento.

O autor faz então a proposição de uma metodologia de ensaio não destrutivo para avaliação da utilização do duto enrugado para operação, com base em teste de pressão com medição de deformação em pontos determinados.

O modelo de enrugamento desenvolvido não realizou acompanhamento ou análise do ponto de instabilidade do modelo (tubo). A ovalização final obtida após o processo de curvamento também não foi levada em consideração na avaliação de integridade desenvolvida.

6.2

AVALIAÇÃO ESTÁTICA

Dutos devem resistir à pressão estática para a qual foram projetados. O presente trabalho avaliou a resistência à pressão interna de tubos curvados com presença de enrugamentos. Foi aplicado um ciclo com pressão interna suficiente para obtenção de tensão circunferencial nominal (tubo reto) equivalente a 100% do limite de escoamento do material (SMYS) e aplicação subsequente de dois ciclos pressão correspondentes a 80% de SMYS.

Com a aplicação da sobrepressão houve nova deformação plástica na região do enrugamento em todos os casos em que aconteceu sua formação. Nenhum duto avaliado apresentou falha na resistência à pressão estática.

6.3

FADIGA

Foi avaliada a integridade estrutural do tubo com presença de rugas quanto à vida em fadiga.

Para avaliação da vida em fadiga dos tubos curvados a frio que apresentaram formação do enrugamento foram utilizados os métodos de Markl e Markl modificado proposto por Rosenfeld; curvas de fadiga do ASME, utilizando as tensões obtidas pelo método de elementos finitos proposto na seção 4.3 e pelo fator de concentração de tensão de Rosenfeld; e por fim, o método de fadiga de baixo ciclo proposto por Manson, utilizando o fator de concentração de Rosenfeld.

Os resultados apresentaram vida diversa em fadiga e grande dispersão de vida para um mesmo caso em estudo, de acordo com o método de vida em fadiga utilizado. O presente trabalho apresentou diversas metodologias de cálculo em fadiga e mostra a diferença de vida entre os métodos para avaliação de um mesmo caso, mas a escolha final do método deve ser realizada pelo usuário.

Tratando de forma conservadora os métodos e os resultados encontrados, o presente trabalho sugere a utilização da equação proposta por Rosenfeld [21, 22], para determinação do fator de concentração de tensão, aplicada ao método ASME [71], de cálculo de vida em fadiga.

Para o enrugamento severo provocado neste trabalho, a vida do tubo foi diminuída sensivelmente em relação a um tubo reto.

Cabe ressaltar que os valores dos ciclos de pressão aqui apresentados variam de 0 a 80% da pressão de projeto, mas os ciclos de pressão os quais os dutos estão sujeitos são bem menos severos que estes.

O presente trabalho mostra que é possível a permanência de tubos com enrugamento no duto, mas eles irão apresentar vida menor que a esperada para o funcionamento dos dutos. Assim, não é necessária a imediata retirada deste tubo, sendo aceitável sua permanência por período especificado de acordo com a geometria do enrugamento e os ciclos de pressão aos quais o duto estará sujeito.

6.4

RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho recomenda analisar dados de ensaios provenientes de testes de campo realizados em tubos de dimensões reais. Deve ser implementado teste de fadiga, com estes tubos, de forma a verificar a coerência dos valores aqui encontrados com os provenientes do comportamento real do tubo.

Verificar a interação de 2 ou mais enrugamentos com relação aos resultados do trabalho aqui desenvolvido.

Realizar análise de fadiga utilizando elementos finitos e seus resultados avaliados junto aos valores aqui encontrados analiticamente.

Analisar a possibilidade de ocorrência de corrosão sob tensão e localizada, devido às tensões residuais e tensões impostas ao duto curvado, como possíveis mecanismos de falha do duto.

Avaliar o impacto da redução na tensão limite provocada pelo efeito Bauschinger desprezado nestas análises. Assim como a ocorrência de colapso plástico progressivo (*ratcheting*)

Realizar avaliação da instabilidade à flexão ocorrida no modelo de forma a identificar o ponto de bifurcação e orientar a formação do enrugamento.

Aprimorar o modelo de FEM, aproximando-o ainda mais do método de curvamento a frio. No modelo aqui proposto deve ser introduzida a não-linearidade de contato além das já avaliadas (material e geometria), de forma a representar o contato entre tubo-sela, tubo-mandrill e tubo-berço. A introdução do revestimento contra corrosão e suas condições de aplicação também aproximarão o modelo das condições reais do tubo utilizado no curvamento a frio de campo.