

7

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros**7.1. Comentário Geral**

Nesta dissertação foram analisadas a magnitude, natureza e comportamento das tensões residuais de fabricação em tubos para dutos. A dissertação visou encontrar meios de separar as tensões residuais daquelas causadas por esforços de trabalho e por esforços externos que agem sobre dutos enterrados, entre eles os movimentos de solos. Foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica sobre tensões residuais incluindo: suas possíveis origens, seus efeitos sobre as estruturas e suas principais técnicas de medição, com ênfase para a técnica do furo cego. Paralelas às pesquisas bibliográficas foram realizadas várias medições laboratoriais em espécimes de um tubo API 5L X60 e de um tubo API 5L X46, para determinação das tensões residuais de fabricação. Nas medições foram usadas a técnica do Furo Cego e uma nova técnica de seccionamento, ambas apoiadas em técnicas extensométricas. Os resultados encontrados foram analisados com base nos efeitos causados pelas etapas do processo UOE de fabricação na geração de tensões residuais. Nessas análises também foram consideradas as informações obtidas nas pesquisas bibliográficas. A partir das curvas de tensões residuais obtidas nas medições no laboratório foram feitas recomendações para medições em campo e forneceram-se algumas metodologias para separação das tensões residuais, dos valores de tensões totais medidos.

7.2. Das Técnicas de Medição Utilizadas

Para o levantamento das curvas de tensões residuais dos tubos levaram-se em consideração os resultados obtidos com a técnica do furo cego (salvos alguns pontos do tubo API 5L X60), que já tem seus procedimentos normalizados pela ASTM E837 e é amplamente utilizada na indústria. Ao todo foram realizadas 29 medições com esta técnica. Ao longo do trabalho desenvolveu-se uma nova técnica de medição de tensões residuais. Esta foi denominada Técnica do Furo

Elíptico. Ela é mais simples e menos sensível a possíveis desvios de medição do que o método do furo cego. Entretanto é uma técnica que na maior parte das vezes será considerada como destrutiva.

A técnica do furo elíptico é uma variação das técnicas de seccionamento. Ela consiste da realização de um corte com razoável profundidade (sendo destrutiva) em um espécime instrumentado com um extensômetro uniaxial colado o mais próximo possível do corte. Os dados de deformação captados pelo extensômetro são tratados como provenientes do alívio de tensões provocado por um furo elíptico. A técnica tem fundamentação matemática nas formulações de Inglis para os campos de tensões em torno de uma placa com furo elíptico. Estes campos são superpostos aos campos de tensões de uma placa sem corte.

Acerca da técnica do furo elíptico podem ser feitas as seguintes considerações:

- As formulações completas fornecidas são válidas para cortes passantes, mas foi feita uma adequação aos casos de cortes não passantes, que foi satisfatoriamente verificada experimentalmente.
- Para os cortes não passantes, capazes de aliviar completamente as tensões sob a área do extensômetro, podem-se usar tanto as formulações da técnica do furo elíptico adaptada para este caso, quanto a simples multiplicação das deformações lidas com sinal invertido pelo módulo de elasticidade do espécime, sendo os dois resultados praticamente coincidentes.
- Os resultados de tensões longitudinais que ocorrem nos tubos obtidas com a técnica do furo elíptico foram bons quando comparados com aqueles encontrados com a técnica do furo cego. Já para a direção circunferencial, a comparação não foi satisfatória. Isto foi creditado às próprias características do processo de fabricação dos tubos. Por isso a técnica requer um melhor tratamento para medições nessa direção para esses equipamentos.

7.3. Dos Resultados

De um modo geral, as medições realizadas nos tubos analisados apontaram altos valores de tensões residuais, por vezes da ordem do limite de escoamento do material dos espécimes. Os resultados foram devidamente analisados e foram colocadas hipóteses - fundamentadas nos conhecimentos adquiridos nas bibliografias consultadas, relacionadas às propriedades do material e características do processo de fabricação - que ajudassem a explicar o comportamento das tensões residuais encontradas nos tubos. Perante resultados mais duvidosos, os experimentos foram repetidos para verificação da existência ou não de possíveis erros de medição. Essas informações podem ser úteis para futuras medições, pois podem ser usadas como parâmetros auxiliares na avaliação de resultados encontrados.

7.4. Das Recomendações

Para as recomendações feitas no *capítulo 6*, é bom reiterar que elas têm como base principal os resultados encontrados nas medições laboratoriais e que, não se garante a sua validade para outros tubos. Destas recomendações pôde-se concluir que:

- A sugestão de não realizar medições na região próxima à solda - mais precisamente no domínio $[-22,5^\circ, 22,5^\circ]$, tendo a solda como origem - é bastante conveniente. Pois, com as grandes variações de tensões nessa região, qualquer desvio no posicionamento das rosetas pode acarretar grandes erros na determinação dos esforços de trabalho, principalmente dos de flexão, cujas tensões dependem da posição na seção transversal do tubo.
- A metodologia da relação entre as tensões residuais longitudinais e circunferenciais¹ forneceu bons resultados para os esforços, principalmente quando foram utilizados os valores máximos extraídos da análise combinatória realizada na determinação dos esforços.

- O método de tratamento das tensões residuais longitudinais como uma margem de incerteza foi recomendado apenas para regiões onde as tensões residuais são baixas. Os valores médios dos esforços calculados foram bem melhores que os valores máximos. Porém, ambos apresentaram erros maiores que os esforços determinados sob a consideração de tensões residuais nulas.
- Os valores de tensões residuais encontrados em laboratório podem ser usados diretamente em campo, caso o tubo do trecho do duto avaliado seja similar ao analisado em laboratório. Os erros decorrentes das prováveis variações de tensões de um tubo para outro (ainda que sejam de classes, dimensões e processos de fabricação iguais) possivelmente serão menores do que os erros da determinação dos esforços feita a partir da consideração da inexistência de tensões residuais de fabricação nos tubos.
- Quando as tensões residuais são ignoradas no cálculo dos esforços de trabalho, como normalmente é feito na prática, os erros são proporcionais à magnitude das tensões residuais existentes. Para o tubo X60, que possui regiões de tensões residuais baixas, encontraram-se valores razoáveis para os esforços. Já para o tubo X46, que tem tensões residuais mais elevadas, os erros encontrados na determinação dos esforços foram grandes. Estes erros mostraram-se indiferentes ao número de medições ao longo da seção transversal do tubo. Ou seja, em tubos com tensões residuais altas, é improvável que se encontrem valores razoáveis para os esforços de trabalho, mesmo com um grande número de medições, se as tensões residuais forem negligenciadas.
- Os esforços atuantes em dutos, calculados a partir dos resultados de tensões medidas no campo por métodos de medição de tensões residuais, não podem ter sua acurácia garantida, a menos que se conheçam bem os valores de tensões residuais nos pontos medidos, pois os resultados são muito sensíveis às variações das tensões.

¹ As tensões residuais poderão ser determinadas em campo, mediante a informação do valor da pressão atuante por parte da operação.

- O conhecimento da distribuição e magnitude das tensões residuais em tubos, representativos do trecho do duto analisado, é muito útil para a avaliação das tensões totais medidas. Sabendo que uma parcela considerável das tensões medidas são devidas às tensões residuais a situação pode ser considerada menos crítica.

7.5. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Ajuste das curvas de tensões residuais causadas pelo processo de fabricação a funções matemáticas, infelizmente ainda não bem conhecidas, que descrevam o seu comportamento.
- Medições de tensões com a Técnica do Furo Elíptico em espécimes com carregamentos conhecidos.