Introdução

1

1.1. Comentários Preliminares e Motivação do Estudo

Avaliações de integridade estrutural para dutos de transporte de óleo e gás, que estão em operação, necessitam do conhecimento dos carregamentos provocados pela montagem e outras causas externas como, por exemplo, o movimento do solo.

O conhecimento dos esforços atuantes nos duto que estão em operação tem como objetivo principal avaliar se um dado trecho de duto está trabalhando dentro de limites seguros para as tensões neles atuantes.

Tensões residuais são aquelas que estão presentes nos componentes independentemente de qualquer carregamento externo. Estas tensões, sendo elásticas, somam-se àquelas causadas pela pressão interna, pela operação de montagem e por outros carregamentos externos. Basicamente todos os componentes e equipamentos mecânicos (isente-se aí aqueles submetidos a tratamentos específicos para alívio) estão sujeitos à ação de tensões residuais.

Até os dias atuais, as medições de tensões atuantes em dutos em operação ainda não têm dispensado um tratamento adequado às tensões residuais. Estas tensões, geradas pelos processos de fabricação, têm sido desconsideradas em grande parte das medições.

1.2. Objetivo

Este trabalho teve como principais objetivos:

- Medir e analisar as distribuições e valores das tensões residuais de fabricação de dois tubos (API 5L X60 e X46) causadas pelo seu processo de fabricação.
- A partir das informações obtidas com os experimentos, fornecer sugestões para medições em campo e desenvolver procedimentos para separar os

valores de tensões residuais dos valores de tensões atuantes em dutos em operação obtidos nas medições de tensões em campo.

O conhecimento da parcela de cada esforço nas tensões medidas fornecerá a informação da existência ou não de flexões e tensões axiais em dutos que estão sendo submetidos a movimentos de solo. Estes esforços precisam ser conhecidos para que providências possam ser tomadas para o seu alívio e conseqüente redução das tensões atuantes no duto.

1.3. Principais Processos de Fabricação de Tubos

O cumprimento dos objetivos desta tese passa pela avaliação das tensões residuais geradas nos processos de fabricação, então é interessante que se tenham informações, ainda que introdutórias, sobre os principais processos de fabricação dos tubos usados na construção de dutovias.

1.3.1. Processo UOE

O processo UOE é assim conhecido pelas etapas de dobramento das chapas até a formação do tubo. Este processo é responsável por grande parte dos tubos que constituem a malha dutoviária nacional e foi o processo de fabricação dos tubos avaliados neste trabalho. A figura 1.1 mostra as etapas deste processo, no qual os tubos não passam por qualquer tratamento de alívio de tensões.

As etapas são [30]:

- Prensamento da borda da chapa;
- Prensamento da chapa plana gerando a forma de "U" e posterior prensamento gerando a formação do "O";
- Soldagem automática interna e externa por arco submerso (SAW Submerged Arc Welding);
- Expansão mecânica a frio (etapa "E" da fabricação);
- Testes Hidrostáticos;
- Ensaios não-destrutivos;
- Ensaios dimensionais;

- Ensaios de laboratório.



Figura 1.1. Apresentação esquemática das etapas do processo UOE [30].

1.3.2. Processo ERW

O nome *Electric Resistence Welding* (ERW) se deve ao processo de soldagem longitudinal nele utilizado, que é por resistência elétrica. Os tubos fabricados pelo processo ERW passam por um tratamento térmico de normalização no cordão de solda para alívio de tensões residuais.

Este processo, apresentado na figura 1.2, consiste nas seguintes etapas [30]:

- Desbobinamento da chapa de aço;
- Formação dos tubos por meio de rolos;
- Soldagem automática por resistência elétrica em alta freqüência;
- Tratamento térmico de normalização da solda;
- Calibragem dimensional;
- Corte e testes hidrostáticos, dimensionais e de laboratório;
- Ensaios não-destrutivos.



Figura 1.2. Apresentação esquemática das etapas do processo ERW [30].

1.3.3. Processo Mannesmann – Laminador Oblíquo

É o principal processo de fabricação de tubos sem costura. A formação do tubo por esse processo é dada a partir de uma barra circular maciça de aço, que é empurrada por dois cilindros oblíquos que o rotacionam e transladam contra um mandril fixo. Obtém-se um tubo bruto, como mostrado na figura 1.3, o qual sofrerá conformação de acabamento através de laminadores perfiladores. Este processo de fabricação provoca rugosidade na parte interna do tubo e no Brasil é fabricado com diâmetro máximo de 14 polegadas.



Figura 1.3. Apresentação esquemática das etapas do processo Mannesmann: (a) Vista bidimensional do procedimento e (b) Vista tridimensional detalhada dos elementos do processo [31].

1.4. Trabalhos Recentes em Determinação de Tensões Residuais em Tubos.

Neste tópico são apresentadas as informações mais relevantes de artigos publicados recentemente. Estes foram julgados representativos das principais linhas de pesquisa desenvolvidas atualmente no esforço de determinar tensões residuais de fabricação em tubos e de maior contribuição para a compreensão e tratamento dos resultados encontrados nas medições realizadas nesta tese. São apresentados modelos analíticos, numéricos e experimentais. Alguns apresentam resultados de medições de tensões de fabricação. São citados, inclusive, alguns relatórios de medições em campo, de tensões atuantes em dutos.

Quach, Teng e Chung, em [37], apresentaram um modelo analítico para definir o perfil de tensões gerado no bobinamento e desbobinamento de chapas. Eles trataram o problema como uma flexão pura com deformação elastoplástica plana. Os resultados obtidos com as formulações propostas foram comparados a um modelo de elementos finitos desenvolvido por eles e os resultados foram totalmente coincidentes entre si. Os resultados também foram qualitativamente coerentes com perfis de tensões residuais típicos de flexão encontrados na literatura. O modelo analítico tem como principais parâmetros as propriedades mecânicas do material da chapa e a curvatura nela aplicada. Ele é válido apenas para chapas com largura que excedem sua espessura em, no mínimo, 50 vezes. Trata-se de um trabalho bem interessante, dado que seu modelo é capaz de descrever os efeitos da geração de tensões residuais das etapas iniciais do processo ERW de fabricação. Segundo seus autores, as formulações também são utilizáveis no dobramento circunferencial da chapa em forma de tubo, tornando-as úteis também para predição de tensões residuais no processo UOE.

Yaghi, Hyde, Becker, Williams e Sun, em [38], fizeram inicialmente uma breve revisão de alguns dos principais artigos sobre simulação e modelamento de tensões residuais resultantes do processo de soldagem. Eles também realizaram um estudo parametrizado, em relação ao raio interno (R_i) e à espessura (t) dos tubos, para avaliar as tensões residuais geradas por uma solda circunferencial (*girth weld*). Analisaram ainda, a influência do diâmetro do tubo nos estados finais de tensão. Foram usados um modelo de paredes finas (7,1 mm de espessura) com quatro passes de solda e um de paredes grossas (40 mm), com soldagem em trinta e seis passes. As principais informações fornecidas pelos resultados, para as várias R_i/t utilizadas, foram:

 Na linha central de solda (LCS) e na ZTA, na maioria das vezes, os picos de tensões trativas ocorreram próximos à superfície interna do tubo de paredes finas e próximos à externa para o tubo de paredes grossas. Ocorre o oposto para os picos de tensões compressivas, quando ocorreram.







Figura 1.4. Modelos de: (a) paredes finas com 4 passes e (b) paredes grossas com 36 passes [38]

 As tensões residuais axiais e circunferenciais da LCS e da ZTA, nas superfícies interna e externa, foram influenciadas pela variação de diâmetro do tubo no modelo de paredes finas. Para o modelo de paredes grossas, apenas as tensões na superfície mostraram-se influenciadas por esse parâmetro. *Law, M., Prask, H., Luzin, V. e Gnaupel-Herold, T., em [39],* apresentaram resultados de medições de tensões residuais em uma chapa de aço API 5L X70, em tubos de mesmo material, fabricados pelo processo ERW e em soldas circunferenciais entre esses tubos. As medições foram realizadas com a técnica de difração de nêutrons, que é extremamente cara; mas tem boa exatidão e pode fornecer o estado triaxial de tensões ao longo da espessura do espécime. Porém os autores só apresentam as tensões longitudinais e circunferenciais. Como principais resultados deste artigo, têm-se que:

- As tensões residuais axiais medidas na chapa bobinada tiveram magnitudes de até 200 MPa e as tensões circunferenciais foram baixas como esperado (figura 1.5).
- Nas medições no tubo, os autores não consideraram as variações de tensão ao longo da circunferência. Na posição medida, que não foi informada, os valores de tensão longitudinal continuaram mostrando-se maiores, ao longo da espessura do espécime (de -370 a +350 MPa, próximo às faces interna e externa, respectivamente), do que as circunferenciais (de -200 a +100 MPa).
- Já na solda circunferencial (figura 1.6), as tensões na direção da solda foram maiores do que as longitudinais, como previsto na referência [38] e em outras literaturas consultadas.



Figura 1.5. Perfil de tensões na chapa bobinada (espessura de parede de 6.4mm)



Figura 1.6. Tensão residual circunferencial na solda circunferencial e nas suas vizinhanças [39].

Bittencourt, Fonseca, Lamy e Oliveira, em [23], realizaram medições de birrefringência acústica em seis amostras de tubos API 5L X70 recém fabricados: metade pelo processo UOE e outra pelo processo ERW (especificados na tabela 1.1), com uma técnica de ultra-som, conhecida por acustoelasticidade. A técnica utilizada é baseada na equação $(B-B_0) = m(\sigma_1 - \sigma_2)$, sendo que, com a determinação da birrefringência acústica (B₀) do tubo descarregado e medindo-se a birrefringência acústica (B) do duto carregado em campo, eliminam-se da medição as tensões residuais de fabricação. Pode-se então, calcular a diferença das tensões principais devidas somente aos esforços de trabalho; sendo "m" uma propriedade conhecida do material chamada de constante acustoelástica. As principais conclusões deste trabalho foram:

- A anisotropia acústica na direção longitudinal foi considerada estatisticamente igual, já na direção circunferencial ocorre uma variação significativa da birrefringência acústica.
- Os autores admitiram que a variação da birrefringência acústica na direção circunferencial dificulta a avaliação de tensões pela técnica de birrefringência acústica.

			,	1		
TUBO	Proc. de	Diâm.	Espessura	Propriedades Mecânicas		
N°	Fabric.	(pol)	(mm)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	Alongamento (%)
1	ERW	20	6,9	542	613	26
2	ERW	20	8,0	593	649	27
3	ERW	20	8,0	581	646	27
4	UOE	24	9,4	530	602	26
5	UOE	24	8,6	543	612	30
6	UOE	24	12,5	550	630	33

Tabela 1.1. Caracterização dos espécimes analisados [23].



Figura 1.7. Pontos e regiões medidos nos tubos [23].



(a)



(b)



Figura 1.8. Resultados da avaliação acustoelástica na direção circunferencial em tubos API X 70: (a) Tubo de menor espessura, (b) Tubos de mesma espessura, (c) Tubo de maior espessura [23].

Dentre os artigos consultados, este foi o estudo com os objetivos mais próximos aos desta tese, o que motivou a apresentação de algumas ressalvas às metodologias e conclusões do artigo:

- Os espécimes foram cortados em comprimentos de 50 cm; a esta distância os cortes já podem ter aliviado uma parcela relevante das tensões residuais no espécime (vide resultados experimentais do capítulo 5).
- O espaçamento longitudinal entre as medições pode ser considerado pequeno (5 cm), o que torna inconsistente a consideração, em medições de campo, de que as variações de anisotropia são desprezíveis nesta direção.

Foram consultados ainda, alguns relatórios, de propriedade da PUC-Rio, referentes a medições de tensão com furo cego em dutos controlados pela Transpetro [40], [41], [42], [43] e [44]. Estes relatórios forneceram uma boa noção de como as medições de tensão em dutos enterrados são realizadas, principalmente:

- As dificuldades das medições em campo. Os espaços são quase sempre reduzidos e é necessária a montagem de uma estrutura para a sustentação do solo em volta da área de medição.
- As diferentes hipóteses utilizadas para a interpretação das tensões calculadas, dependendo da extensão da área desenterrada. Isto foi muito importante para as formulações do capítulo 6.

Foi observado também que, em todos os relatórios onde os momentos e o esforço axial foram calculados, as tensões residuais longitudinais de fabricação foram negligenciadas (por serem desconhecidas) Isto pode ter acarretado erros significativos nos esforços determinados, como será visto ao longo desta dissertação.

1.5. Apresentação dos próximos capítulos

Capítulo 2

O capítulo 2 faz um tratamento geral sobre tensões residuais. Os seguintes tópicos são apontados: diferentes conceitos, seus efeitos sobre os equipamentos, possíveis origens, principais mecanismos causadores e os processos no quais estão inclusos. Fala-se das principais técnicas de medição e mostra-se uma comparação entre elas ao final.

Capítulo 3

O capítulo 3 é inteiramente dedicado à técnica do furo cego, que foi uma das utilizadas nas medições deste trabalho. Faz-se um resumo sobre extensometria. Disponibiliza-se um breve histórico sobre a evolução da técnica até a forma atual de utilização. Descrevem-se os modos de determinação dos coeficientes de alívio necessários para o tratamento dos dados de deformação medidos. Cita-se as etapas que compreendem a execução da técnica e suas criticidades dentro do processo para se obter medições confiáveis. Por fim, é feita uma abordagem à cerca da Norma ASTM E837, que rege a aplicação da técnica do furo cego.

Capítulo 4

No capítulo 4 descreve-se a Técnica do furo elíptico, que é uma variante das técnicas de seccionamento e que foi criada neste trabalho. Fala-se de suas formulações e descrevem-se os seus principais parâmetros e o cálculo dos coeficientes de alívio usados na análise extensométrica. Comparam-se graficamente os resultados obtidos com as formulações adotadas aos resultados do equacionamento para um furo circular. Definem-se as relações entre as deformações lidas, a partir da realização dos cortes, com as tensões existentes no espécime avaliado.

<u>Capítulo 5</u>

O capítulo 5 apresenta a descrição de todas as medições realizadas neste trabalho: seus procedimentos e objetivos. Nele, mostram-se todos os resultados, na forma de gráficos e tabelas, com as respectivas análises.

<u>Capítulo 6</u>

Neste capítulo são realizadas algumas discussões sobre os possíveis perfis de tensões a serem encontrados em medições *in situ*. São feitas algumas recomendações para medição de tensões atuantes em dutos. São apresentadas algumas metodologias para separar as tensões residuais causadas pelo processo de fabricação, das tensões atuantes medidas.

Capítulo 7

Neste, por fim, são apresentadas as conclusões e as recomendações para futuros trabalhos.