AVALIAÇÃO DA ACUSTOELASTICIDADE EM TUBOS DE AÇO API 5L X 46 COM E SEM COSTURA VISANDO O ESTUDO DO ESTADO DE TENSÕES

Bruno Reis Cardoso

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHÁRIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. João da Cruz Payão Filho, Dr.-Ing.

Dr. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D. Sc.

Prof. Ari Sauer Guimarães, D. Sc.

Dr. Carlos Alfredo Lamy, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL MAIO DE 2007

CARDOSO, BRUNO REIS

Avaliação da Acustoelasticidade em Tubos de Aço API 5L X46 Com e Sem Costura Destinada ao Estudo do Estado de Tensões [Rio de Janeiro] 2007 XII, 96 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2007) Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE 1. Acustoelasticidade, 2. Isotropia I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À Raquel, à Minha Família e aos verdadeiros amigos.

AGRADECIMENTOS

A COPPE e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Ao professor João da Cruz Payão Filho pela atenção, paciência e dedicação como orientador.

Ao Doutor Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt por acreditar neste trabalho e colaborar de forma inigualável com imensa dedicação e amizade.

Aos funcionários e bolsistas do Instituto de Engenharia Nuclear – IEN, que contribuíram na execução dos ensaios, em especial ao engenheiro Manoel Antônio da Costa Fonseca, ao técnico Daniel Salgado Martorelli, e aos bolsistas Filipe Andrade Alvarenga e Ricardo de Pádua Oliveira Sá Nery.

A todos os colegas do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, em especial a Doutora Heloisa da Cunha Furtado e a técnica Roberta Martins de Santana pela valiosa e indispensável ajuda.

Ao Cento de Tecnologia de Solda – CETEC de Solda, em especial ao Engenheiro Mário Bittencourt Quirino de Almeida, Gerente de Tecnologia de Solda, pela realização dos ensaios de carregamento das tiras dos tubos.

Aos meus pais e minha irmã pelo apoio dado em todas as fases deste trabalho.

À Raquel que sempre esteve ao meu lado me ajudando a transpor todos momentos difíceis da dissertação com muita compreensão e paciência.

A Deus que sempre esteve ao meu lado, guiando o meu caminho e me fortalecendo para transpor todos os imprevistos e momentos difíceis.

iv

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DA ACUSTOELASTICIDADE EM TUBOS DE AÇO API 5L X 46 COM E SEM COSTURA VISANDO O ESTUDO DE TENSÕES

Bruno Reis Cardoso

Maio/2007

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Este trabalho apresenta uma avaliação acustoelástica de tubos API 5L X46 com e sem costura, utilizados no transporte de óleo e gás. Nesta pesquisa foi testado e utilizado um equipamento portátil capaz de gerar e processar o sinal ultra-sônico em tempo real. O programa experimental consistiu da determinação da birrefringência acústica em diferentes pontos nos tubos e em tiras obtidas após os cortes dos tubos. Além disso, foram realizados ensaios de carregamento uniaxial nas tiras e a caracterização microestrutural nos dois tubos. Os resultados mostram uma diferença no comportamento acústico dos tubos, sugerindo uma anisotropia acústica no tubo com costura e uma isotropia acústica no tubo sem costura. A comprovação da isotropia acústica do tubo sem costura implica na vantagem de se utilizar a técnica ultra-sônica como uma ferramenta para avaliação de integridade estrutural da rede dutoviária brasileira.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ACOUSTOELASTICITY EVALUATION OF API 5L X 46 SEAMED AND SEAMLESS STEEL PIPES DESTINATED TO THE STUDY OF STRESS STATES

Bruno Reis Cardoso

May/2007

Advisor: João da Cruz Payão Filho

Department: Metallurgical and Materials Engineering

This work presents an acoustoelastic evaluation of seamed and seamless API 5L X46 steel pipes used in oli and gas transportation. In this research, a portable equipment able to generate and process the ultrasonic signal in real time was tested and used. Experimental procedure consisted in measuring the acoustic birrefringence in different points of the pipes and in stripes obtained from cutting the pipes. Uniaxial stress tests and microstructural characterization were also performed. The results show a difference in the acoustic behavior of the pipes, suggesting that the seamed pipe has an acoustic anysotropy, on the other hand, the seamless pipe has a acoustic isotropy. The confirmation of the acoustic isotropy of the seamless pipe implies in the advantage of using the ultrasonic technique for stress measurements as a tool for integrity assessment of pipelines in Brazil.

SUMÀRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA 1.3. ESCOPO DA PESQUISA	2
CAPÍTULO 2 – TUBOS DE AÇO CARBONO – CONSIDERAÇÕES GERAIS	3
2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS 2.2 – PRINCIPAIS MATERIAIS PARA TUBOS 2.3 – TUBOS PARA TRANSPORTE DE ÓLEO E GÁS	3 3 4
 2.3.1 – Caracterização	4 7 8 8
2.4.2 – Processo de Fabricação de Tubos Sem Costura 2.4.3 – Fabricação de Tubos Com Costura – Processo ERW 2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	9 <i>11</i> 12
CAPÍTULO 3 – MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	13
 3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13 13 13 15 18 18
3.5.2 – Aplicações da Técnica Ultra-sônica para Medições de Tensão 3.6 – TENSÕES RESIDUAIS EM TUBOS 3.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	20 29 40
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E METODOLOGIA DE ESTUDO	41
 4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS 4.2 – MATERIAL DE ESTUDO 4.3 – EQUIPAMENTO PORTÁTIL PARA MEDIÇÃO DO TEMPO DE PERCURSO DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS 4.4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL 4.4.1 – Medição da Birrefringência Acústica dos Tubos 4.4.2 – Ensaio de Carregamento Uniaxial nas Tiras dos Tubos 	41 41 42 54 54 58
4.4.3 – Caracterização Microestrutural dos Tubos 4.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	59 64
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
 5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	65 65 65 68 71 77
5.4 – CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS TUBOS 5.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	80 89

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	90
SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Principais materiais utilizados na fabricação de tubos [1]4
Figura 2.2. Principais processos de fabricação de tubos [1]
Figura 2.3. Etapas do processo de fabricação Mannesmann [1]: inicial (a); laminação do tubo (b)9
Figura 2.4. Etapas de acabamento do processo de Fabricação Mannesmann [1]: desempeno (a); alisamento(b)10
Figura 2.5. Etapas iniciais do Processo ERW [1]: conformação inicial da chapa; dobramento final do tubo11
Figura 3.1. (a) Onda Longitudinal; (b) Onda cisalhante [12]16
Figura 4.1. Materiais de estudo: tubo sem costura e tubo com costura
Figura 4.2. Sistemas para aquisição, processamento e medição do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas: equipamento portátil (a); sistema atual (b).
Figura 4.3. Programa utilizado no equipamento portátil: tela do programa (a); detalhe dos sinais original e interpolado em L16 (b)
Figura 4.4. Sinais ultra-sônicos gerados na direção longitudinal: equipamento portátil (a); equipamento atual (b)45
Figura 4.5. Resultados de birrefringência acústica calculada a partir das medidas de tempo obtidas pelo equipamento portátil e pelo equipamento atual 45
Figura 4.6. Caixa de dialogo do software para realização do teste de hipótese 49
Figura 4.7. Gráfico ilustrativo do comportamento dos aços quando submetidos a ensaios de tração uniaxial para levantamento da constante acustoelástica. 52
Figura 4.8. Resultados dos ensaios de levantamento das constantes acustoelásticas de duas tiras de tubo API 5L X70 utilizando o equipamento portátil e o equipamento atual
Figura 4.9. Aquisição dos sinais ultra-sônicos56
Figura 4.10. Posições do transdutor durante aquisição dos sinais: direção longitudinal (a); e direção transversal (b)56
Figura 4.11. Disposição das regiões para medição de tempo nos tubos: tubo com costura (a); e tubo sem costura (b)57
Figura 4.12. Ensaio de carregamento nas tiras: aquisição do sinal ultra-sônico em uma tira sob carregamento uniaxial de tração (a); detalhe do transdutor

acoplado à tira no ponto central do corpo-de-prova sendo submetido a carregamento(b)59
Figura 4.13. Arranjo das amostras utilizadas na preparação metalográfica: tubo sem costura (a); tubo com costura (b)61
Figura 5.1. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 12+h do tubo com costura
Figura 5.2. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 3h do tubo com costura
Figura 5.3. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 6h do tubo com costura
Figura 5.4. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 9h do tubo com costura
Figura 5.5. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 12-h do tubo com costura68
Figura 5.6. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 12h do tubo sem costura
Figura 5.7. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 3h do tubo sem costura
Figura 5.8. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 6h do tubo sem costura
Figura 5.9. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 9h do tubo sem costura
Figura 5.10. Comportamento da birrefringência acústica ao longo das regiões dos tubos com e sem costura
Figura 5.11. Corte do tubo sem costura: vista longitudinal da abertura de 13mm gerada após perda de material e alívio de tensões residuais (a); vista da abertura de 13mm pela seção circular do tubo (b)
Figura 5.12. Corte do tubo com costura: abertura inicial de 9,7mm devido a perda de material (a); vista longitudinal da abertura de 36,7mm gerada após alívio de tensões residuais (b); vista da abertura de 36,7mm pela seção circular do tubo (c); detalhe da abertura final (d)
Figura 5.13. Comportamento da birrefringência acústica ao longo das regiões e tiras dos tubos com e sem costura76
Figura 5.14. Comportamento da birrefringência acústica medida nas tiras do tubo com costura durante ensaio de tração uniaxial
Figura 5.15. Comportamento da birrefringência acústica medida nas tiras do tubo sem costura durante ensaio de tração uniaxial79

Figura 5.17. Micrografias das amostras retiradas do tubo com costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal. Ataque: Beraha
Figura 5.18. Micrografias das amostras retiradas do tubo sem costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal. Ataque: Nital 2%
Figura 5.19. Micrografias das amostras retiradas do tubo sem costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal. Ataque: Beraha
Figura 5.20. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura nas amostras do tubo com costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal
Figura 5.21. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura nas amostras do tubo sem costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal
Figura 5.28. Espectro de EDS obtido da amostra transversal do tubo com costura
Figura 5.29. Espectro de EDS obtido da amostra transversal do tubo sem costura

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Comparação entre métodos existentes de medição de tensões residuais [10]15
Tabela 4.1. Teste de Hipótese para as médias das medidas de birrefringência acústica realizadas com os equipamentos portátil e atual50
Tabela 5.1 – Diferença entre os tempos de percurso da onda ultra-sônica nas regiões dos tubos estudados73
Tabela 5.2 – Tamanho de grão e fração volumétrica dos constituintes microestruturais das amostras longitudinal e transversal dos tubos com e

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte de gás natural, petróleo e seus derivados, por meio de dutos, apresenta-se como uma alternativa atraente. Contudo, dutos instalados em terrenos geologicamente instáveis podem estar sujeitos à ocorrência de danos e, no caso extremo, ao colapso dos mesmos.

Neste sentido, torna-se necessária a previsão do comportamento de dutos em longo prazo. Para a determinação da vida útil é essencial obter, de forma precisa, o grau de tensão e deformação nas regiões danificadas. Para isto, são utilizadas técnicas não destrutivas para determinação de tensão e deformação em componentes danificados. Uma dessas técnicas é baseada na medida da velocidade de ondas ultra-sônicas. A técnica ultra-sônica para medida de tensões é função da variação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, quando esta atravessa um material tensionado, fenômeno conhecido como acustoelasticidade.

A literatura mostra que as etapas de conformação mecânica durante a fabricação de tubos com costura, oriundos de chapas laminadas, criam diferentes graus de anisotropia ao longo da seção transversal do tubo. Por outro lado, tubos sem costura apresentam um comportamento acústico diferente dos com costura. Essa diferença de comportamento entre os tubos é peça fundamental na utilização da técnica ultra-sônica em tubos sem costura.

A avaliação da acustoelasticidade, de tubos de aço API 5L X46 fabricados por diferentes processos (Com costura/ERW e Sem Costura) aponta para uma possível isotropia acústica dos tubos sem costura o que possibilita a medição de tensões por ultra-som. A análise estatística das medidas de birrefringência acústica nos tubos, os ensaios de carregamento em tiras obtidas pelos cortes dos tubos e a caracterização microestrutural de amostras dos materiais corroboraram para observar diferenças significativas entre os materiais.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho visa a implementação de um equipamento portátil capaz de gerar e processar o sinal ultra-sônico em tempo real, através da comparação de medidas realizadas por outro equipamento utilizado no laboratório de ultra-som no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN).

O trabalho busca também apresentar o estudo do comportamento acustoelástico de tubos com e sem costura, de forma a subsidiar a técnica ultra-sônica de avaliação de tensões para sua aplicação como ferramenta de avaliação de integridade estrutural da rede dutoviária brasileira.

1.3. ESCOPO DA PESQUISA

A dissertação é composta de 6 capítulos, apresentando inicialmente, neste capítulo a introdução ao tema e os objetivos da pesquisa desenvolvida.

O Capítulo 2 apresenta os processos de fabricação, as especificações e classificações dos aços utilizados no transporte de óleo e gás.

No Capítulo 3 são apresentadas as características da técnica ultra-sônica para medição de tensões utilizada no presente trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os materiais de estudo, o equipamento portátil implementado e o programa experimental desenvolvido.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões dos ensaios realizados nos tubos utilizados na pesquisa.

No Capítulo 6, dá-se o encerramento do trabalho com a apresentação das principais conclusões. São propostas também recomendações para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2 – TUBOS DE AÇO CARBONO – CONSIDERAÇÕES GERAIS

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A seguir são apresentados aspectos referentes aos materiais utilizados em tubulações, suas características, especificações e uma breve discussão sobre os processos de fabricação utilizados nos materiais estudados no presente trabalho.

2.2 – PRINCIPAIS MATERIAIS PARA TUBOS

Existem diversos tipos de tubos que se diferenciam pelo material utilizado e pelo processo de fabricação empregado.

A escolha do material adequado para a fabricação do tubo depende de alguns fatores, sendo os principais [1]:

- Fluido conduzido;
- Condições de serviço;
- Nível de resistência do material;
- Natureza dos esforços mecânicos;
- Disponibilidade de materiais;
- Sistemas de ligações;
- Custo;
- Graus de segurança e experiência exigidos;
- Facilidades de fabricação e montagem;
- Resistência ao escoamento do fluido;
- Tempo de vida previsto.

Neste sentido, pode-se classificar os tipos de tubos em função dos materiais utilizados na fabricação como: Tubos Metálicos, Tubos Não Metálicos e Tubos de Aço com Revestimento, como apresenta a Figura 2.1.

Dentre os tipos de tubos apresentados, merecem destaque os tubos metálicos ferrosos de aço carbono devido sua grande utilização e por ser objeto de estudo do presente trabalho.



Figura 2.1. Principais materiais utilizados na fabricação de tubos [1].

2.3 – TUBOS PARA TRANSPORTE DE ÓLEO E GÁS

2.3.1 – Caracterização

As características especiais das tubulações para oleodutos e gasodutos exigem o emprego de aços que respondam às exigências de elevada resistência mecânica com boa tenacidade, boa soldabilidade e que sejam resistentes aos efeitos danosos causados pela ação do meio ambiente e/ou transportados nas tubulações [2].

Os materiais que melhor respondem a estas exigências, com melhores preços relativos, são os aços carbono e os aços alta resistência baixa liga (ARBL)

Considerando-se as várias possibilidades de classificação dos aços para tubulações, a mais usual é aquela que se baseia na microestrutura, uma vez que as propriedades mecânicas de tenacidade são determinadas pela microestrutura. Assim, as microestruturas dos aços para tubulações foram classificadas da seguinte maneira:

- Ferrita-perlita convencional;
- Ferrita acicular/bainita;
- > Multifase (ferrita poligonal e uma segunda fase: bainita e/ou martensita) [3].

Projetos atuais, mais rigorosos no comportamento de tubulações, requerem materiais que possuam níveis de resistência mecânica elevada. Juntamente com o aumento da demanda de tubos de paredes finas para tubulações, também é requerida uma cuidadosa técnica de processamento para as propriedades previstas.

Porém, uma restrição por parte dos problemas de produção é a tendência a ocorrência de trincas nas tubulações expostas ao meio ambiente (trincas de corrosão sob tensão).

O aço deve possuir uma estrutura de granulação fina e um controle da morfologia das inclusões. Assim, a chapa deve ser produzida por laminação controlada, que fornece um aço acabado apresentando uma estrutura de grãos finos.

As propriedades de tenacidade e ductilidade são de suma importância para as tubulações, pois elas são necessárias para impedir o início e propagação da fratura. A –20°C as chapas dos materiais a serem utilizados em tubulações devem absorver uma energia média mínima de 90J/cm² e apresentar uma área cisalhada de 80%, sendo que os mesmos valores devem ser garantidos para 0°C [2].

Entre todos os materiais industriais existentes, o aço carbono é o que apresenta menor relação custo/resistência mecânica, além de ser um material fácil de soldar e de se conformar, e também por ser de fácil acesso no mercado. Por todos esses motivos, o aço carbono é o chamado "material de uso geral" em tubulações industriais, isto é, só se deixa de empregar o aço carbono quando houver alguma circunstância especial que o proíba, e desta forma, todos os outros materiais são utilizados apenas em alguns casos especiais. Emprega-se o aço carbono para água doce, vapor de baixa pressão, condensado, ar comprimido, óleos, gases e muitos outros fluidos pouco corrosivos, em temperaturas desde -45°C, e a qualquer pressão [1].

A resistência mecânica do aço carbono começa a sofrer uma forte redução em temperaturas superiores a 400°C, devido principalmente ao fenômeno de deformações permanentes por fluência, que começa a ser observado em temperaturas superiores a 370°C, e que deve ser obrigatoriamente considerado para qualquer serviço em

temperaturas acima de 400°C. Neste caso é aconselhável o uso de aços com adições de Cr e Mo.

Em temperaturas superiores a 530°C o aço carbono sofre uma intensa oxidação superficial, quando exposto ao ar, com formação de grossas crostas de óxidos, o que o torna inaceitável para qualquer serviço contínuo. Deve ser ressaltado que em contato com outros meios essa oxidação pode se iniciar em temperaturas mais baixas. A exposição prolongada do aço carbono a temperaturas superiores a 440°C pode causar ainda uma degradação microestrutural no material, causando uma redução nas propriedades mecânicas previstas para sua aplicação [1].

Pelos motivos apresentados, são recomendados os seguintes limites máximos de temperatura para tubulações de aço carbono.

- Tubulações principais, serviço contínuo: 450°C.
- Tubulações secundárias, serviço contínuo: 480°C.
- Máximos eventuais de temperatura, de curta duração e não coincidentes com grandes esforços mecânicos: 520°C.

Quanto maior for a quantidade de carbono no aço maior será a sua dureza e maiores serão os limites de resistência e de escoamento; em compensação o aumento do carbono prejudica a soldabilidade e a ductilidade do aço. Por esse motivo, em aços para tubos limita-se a quantidade de carbono até 0,35%, sendo que até 0,30% de C a solda pode ser executada sem maiores dificuldades e até 0,25% de C os tubos podem ser facilmente dobrados a frio [1].

Os aços-carbono podem ser acalmados, com adição de até 0,6% de Si, para eliminar os gases, ou efervescentes, que não contêm Si. Os aços carbono acalmados têm estrutura metalúrgica mais fina e uniforme, sendo de qualidade superior aos efervescentes. Recomenda-se o emprego de aços acalmados sempre que as temperaturas de serviço forem acima de 400°C, mesmo que por pouco tempo, ou para temperaturas inferiores a 0°C.

Os aço de baixo carbono (até 0,25%C) têm limite de resistência da ordem de 310 a 370MPa,e limite de escoamento de 150 a 220MPa. Para os aços de médio carbono (até 0,35%C), esses valores são respectivamente 370 a 540MPa, e 220 a 280MPa.

Em temperaturas muito baixas o aço carbono apresenta um comportamento quebradiço, estando sujeito a fraturas frágeis repentinas. Esse efeito é atenuado quando o aço é de baixo carbono e normalizado para obtenção de uma granulação fina. Por esse motivo, os aços para trabalho em temperaturas inferiores a 0°C devem ser aços acalmados, com o máximo de 0,3% de carbono, normalizados para obtenção

de uma granulação fina, e submetidos ao teste de impacto Charpy na temperatura mínima prevista de operação. As normas técnicas estipulam que a temperatura mínima limite para os aços carbono é de –29°C, mas é prática corrente de emprego desses aços até –45°C.

O aço carbono quando exposto à atmosfera sofre uma corrosão uniforme, que é tanto mais intensa quanto maiores forem a umidade e a poluição do ar. O contato direto com o solo causa não só a ferrugem como uma corrosão alveolar penetrante, que é mais grave em solos úmidos ou ácidos; esse contato deve por isso ser sempre evitado [1].

2.3.2 – Especificações de Material de Tubulações

Chamam-se especificações de material de tubulação, as normas específicas detalhando todos os materiais para as tubulações das diversas classes de serviços, em um determinado projeto ou instalação.

Cada especificação de material abrange sempre uma certa faixa de variação de pressão e de temperatura, e geralmente também uma certa faixa de diâmetros, com um valor máximo e um valor mínimo.

Dentre as diversas especificações para tubulações industriais, será abordada a norma API 5L (2000) do American Petroleum Institute, já que esta é a especificação dos tubos estudados no presente trabalho.

Esta especificação cobre tubos de aço com e sem costura, com o propósito de fornecer padrões para o uso correto de tubulações na condução de gás, água e óleo.

A versão mais atual da norma API 5L [4] incorporou a norma 5X, esta é a especificação aplicada a tubos com ou sem costura, de aços carbono e aços alta resistência baixa liga (ARBL) com características de elevada resistência, aliada à boa soldabilidade, baixo nível de inclusões e boa qualidade superficial, especiais para gasodutos e oleodutos. Os tubos desta especificação não devem ser empregados para temperaturas acima de 200°C.

Os tubos da classificação API são designados por seu mínimo esforço de escoamento aceitável, em libras por polegada quadrada (psi). Por exemplo, um tubo de grau X46 tem um limite de escoamento mínimo de 46.000psi (317MPa).

A composição química dos aços para dutos API é variada para fornecer propriedades especificas. Conteúdos máximos e mínimos são descritos na especificação API 5L para vários graus, principalmente para os elementos de microliga Mn, P, S, Co, V, Ti. Nem todos esses elementos estão presentes em todos os graus. Alguns deles são adicionados a certos graus de aços para dutos para proporcionar

características especificas. De forma geral, a quantidade de Mn requerido em tubos para dutos incrementa-se com o incremento de grau (ou resistência) [4].

Os tubos dos graus X56 a X80 não são de aço carbono, e sim de aços alta resistência baixa liga [1].

2.4 – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE TUBOS

2.4.1 – Processos Existentes

Os tubos de aço carbono utilizados na indústria podem ser obtidos por diversos processos de fabricação.

Neste sentido, pode-se classificar os tipos de tubos em função dos seus processos de fabricação, como apresenta a Figura 2.2.



Figura 2.2. Principais processos de fabricação de tubos [1].

A indústria de tubos vem encontrando desafios no mercado atual. Primeiramente porque os usuários finais vêm exigindo produtos numa variedade maior de tamanhos e formas. Além disso, produtos de melhor qualidade e menores custos são exigidos por todos os fabricantes. Para cumprir essas necessidades, é necessário o uso de ferramentas otimizadas e técnicas avançadas de controle de qualidade e fabricação.

Tubos obtidos por diferentes processos de fabricação terão vantagens e desvantagens específicas, dependendo da aplicação a qual serão destinados [5].

Dentre os tipos de tubos apresentados, merecem destaque os tubos sem costura obtidos pelo processo de laminação e os com costura obtidos pelo processo ERW, por serem os processos de fabricação dos tubos utilizados no presente trabalho.

^{1 -} Processo de fabricação onde as principais etapas de conformação são: conformação em "U", "O" e expansão, "E".

^{2 –} Processo de fabricação onde após principais etapas de conformação o tubo é soldado por resistência elétrica.

2.4.2 – Processo de Fabricação de Tubos Sem Costura

Os processos de laminação são os mais importantes para a fabricação de tubos de aço sem costura; empregam-se para a fabricação de tubos de aços-carbono, aços-liga e aços inoxidáveis, com diâmetros variando de 80 até 650mm [1].

Existem vários processos de fabricação por laminação, o mais conhecido e utilizado na indústria é o processo Mannesmann, que utiliza um lingote cilíndrico de aço, com o diâmetro externo aproximado ao do tubo que se vai fabricar que é aquecido por volta de 1.200°C e levado ao "laminador oblíquo", apresentado na Figura 2.3a. Este laminador tem dois rolos de cone duplo, cujos eixos fazem entre si um pequeno ângulo, como mostra a Figura 2.3b.

O lingote é colocado entre os dois rolos, que o prensam fortemente, e lhe imprimem, ao mesmo tempo, um movimento de helicoidal de rotação e translação. Como conseqüência do movimento de translação, o lingote é pressionado contra um mandril cônico que se encontra entre os rolos. O mandril abre um furo no centro do lingote, transformando-o em tubo, e alisa continuamente a superfície interna recémformada. O mandril, que é fixo, está colocado na extremidade de uma haste com um comprimento maior do que o tubo que será formado.



Figura 2.3. Etapas do processo de fabricação Mannesmann [1]: inicial (a); laminação do tubo (b).

O tubo formado nessa primeira operação tem paredes muito grossas. A ponteira é então retirada e o tubo ainda quente, é levado para um segundo laminador oblíquo, com um mandril de diâmetro um pouco maior, que afina as paredes do tubo, aumentando o comprimento e ajustando o diâmetro externo.

Depois das duas passagens pelos laminadores oblíquos o tubo está bastante empenado. Passa então em uma ou duas máquinas desempenadoras de rolos. O tubo sofre, finalmente, uma série de operações de calibragem dos diâmetros externo e interno, e alisamento das superfícies externa e interna. Essas operações são feitas em várias passagens em laminadores com mandris e em laminadores calibradores, Figuras 2.4a e 2.4b, respectivamente [1].



Figura 2.4. Etapas de acabamento do processo de Fabricação Mannesmann [1]: desempeno (a); alisamento(b).

As linhas de fabricação de tubos obtidos por laminação automática contam com instalações para tratamentos térmicos dos tubos [1].

Tubos sem costura têm uma homogeneidade impressionante na direção circunferencial, e por isso, são mais resistentes à pressão interna e a torsão. No processo de fabricação de tubos sem costura, a vida útil dos mandris é um importante fator para obtenção de tubo de qualidade consistente [5].

Ao avaliarem o processo de fabricação de tubos sem costura pelo método de elementos finitos, Reggio *et al* [6] mostram que uma distribuição de temperatura estável na ponta do mandril é crucial para a homogeneidade dos tubos, pois diferentes distribuições de temperatura levam a diferentes microestruturas. A otimização da geometria dos canais de água de refrigeração garantiria uma transferência de calor adequada do mandril para a água, contribuindo assim para aumentar a vida útil do mandril.

2.4.3 – Fabricação de Tubos Com Costura – Processo ERW

Para os tubos com solda longitudinal a matéria-prima pode ser uma bobina de chapa fina enrolada, ou chapas planas avulsas. As bobinas são usadas para a fabricação contínua de tubos de pequeno e de médio diâmetro (450mm), empregandose chapas planas para tubos de diâmetros médios e grandes. A bobina ou a chapa é calandrada no sentido do comprimento até formar o cilindro, sendo então as bordas soldadas entre si [1].

Dois terços dos tubos de aço fabricados no mundo, são obtidos por processos de fabricação utilizando soldagem [5].

Nos processos de fabricação de tubos com costura por resistência elétrica (ERW), a bobina, depois de aparada na largura certa, é conformada inteiramente a frio, em uma máquina de fabricação contínua com rolos que comprimem a chapa de cima para baixo e depois lateralmente, como mostram as Figuras 2.5a e 2.5b.



Figura 2.5. Etapas iniciais do Processo ERW [1]: conformação inicial da chapa; dobramento final do tubo.

Num outro estudo utilizando o método de elementos finitos, Han *et al* [7] analisaram o processo ERW e compararam resultados experimentais obtidos por strain-gages colados ao longo do comprimento de numa chapa de aço que foi conformada, com resultados calculados a partir de um modelo matemático elastoplástico. Os resultados calculados se encontraram de acordo com os experimentais e foi possível perceber que as deformações transversais são mais significativas que as longitudinais durante a conformação da chapa. Uma vez atingido o formato final do tubo, é feita a soldagem pelo efeito da passagem de uma corrente elétrica local de grande intensidade e da forte compressão de um bordo contra o outro pela ação de dois rolos laterais [1].

Após a solda, a rebarba externa é removida e em seguida o tubo é resfriado, desempenado, calibrado e cortado no comprimento certo.

Para diâmetros de 150 a 200mm, os tubos são soldados a topo, e para diâmetros maiores a solda é sobreposta, sendo os bordos previamente chanfrados.

As tolerâncias de fabricação dos tubos com costura obtida pelo processo ERW podem ser mais rigorosas do que as relativas aos tubos sem costura.

Os tubos soldados por resistência elétrica costumam sofrer tratamento térmico de normalização para o refinamento da estrutura próximo à solda, e para alívio das tensões resultantes da solda [1].

Métodos de soldagem vêm sendo melhorados para uma operação mais rápida e com um controle de qualidade das soldas com sistemas de inspeção por laser, sistemas de guia e máquinas de solda automatizadas. A otimização da forma das extremidades é requerida para se obter uma zona de soldagem suave sem nenhuma deformação e redução de espessura ao longo da extremidade do tubo durante a conformação das chapas [5].

Os tubos com costura são quase sempre de qualidade inferior aos sem costura, mas o seu uso é bastante generalizado por serem geralmente mais baratos [1].

2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento dos materiais utilizados, das especificações utilizadas na indústria e dos processos de fabricação dos tubos é necessário para uma melhor compreensão do comportamento do material e das conseqüências destas etapas na distribuição das tensões residuais no mesmo.

CAPÍTULO 3 – MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os aspectos referentes às técnicas utilizadas para medição de tensões residuais, com foco na técnica ultra-sônica da birrefringência acústica. Também são apresentadas informações obtidas na literatura referentes à medição de tensões residuais em tubos.

3.2 – TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são tensões auto-equilibradas que continuam existindo numa peça quando todo o carregamento externo é removido. Geralmente essas tensões surgem durante os processamentos térmicos e/ou mecânicos ao qual uma peça é sujeita (fundição, soldagem, laminação...) [8]. Dentre as principais causas de seu aparecimento, a ocorrência de uma solicitação acima do limite de escoamento do material, ou seja, ocorrência de deformação plástica, em certa região da peça é a mais comum [8]. Estas tensões podem afetar de modo determinante a vida em serviço de componentes.

Como corpos sujeitos apenas a tensões internas estão em equilíbrio, todos os sistemas de tensões residuais têm suas resultantes de força e momento, iguais a zero.

3.3 – TÉCNICAS EXISTENTES PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

A avaliação de integridade de componentes industriais está se tornando cada vez mais importante por razões econômicas e de segurança. A integridade de um componente depende da ausência de defeitos prejudiciais, da presença de tensões residuais dentro de níveis aceitáveis, quando não for possível eliminá-las, e da presença de uma microestrutura apropriada com propriedades mecânicas que não sofram degradação sob condições de operação. Portanto, a avaliação de tensões residuais representa uma etapa fundamental em inspeções antes e durante a operação de qualquer componente para a avaliação de integridade do mesmo.

A avaliação de tensões em serviço em estruturas é realizada tradicionalmente com "strain-gages"³. A técnica do furo cego, que também utiliza "strain-gages", permite

^{3 -} Extensômetros elétricos.

avaliar o nível de tensões residuais na estrutura. Usualmente, um pequeno furo de 1 a 6mm de diâmetro é feito até uma profundidade de 2mm, o alívio de tensões causado pelo furo é captado por uma roseta com três strain-gages ao redor do furo. As tensões medidas nas três direções são úteis para determinar a magnitude e as direções das tensões principais máximas e mínimas [9]. Como o furo não causa um impacto significativo na integridade estrutural do componente, esta técnica pode ser considerada como semidestrutiva [9]. Estas duas técnicas, que estão bem estabelecidas e são muito empregadas, permitem determinar o nível de tensões para análise da segurança estrutural e acompanhamento das variações de tensões e deformações ao longo do tempo em estruturas sob carregamentos cíclicos. Porém, assim como ocorre nas outras técnicas, elas também apresentam limitações.

Dentre as técnicas não destrutivas existentes para medição de tensões residuais destacam-se a difração de nêutrons, a difração de raios-x, a elastomagnética e a ultra-sônica [9].

A técnica da difração de nêutrons é a mais precisa, medindo diretamente a mudança na distância dos planos cristalinos do material, a qual varia diretamente com o nível de tensão aplicado. Por ser uma técnica cara devido ao custo do acelerador de partículas, que atua como fonte de nêutrons, esta técnica foi substituída na indústria pela técnica da difração de raios-x. É bem conhecido que picos de intensidade num feixe de raios-x difratado ocorrem quando a lei de Bragg é obedecida. Na presença de um campo de macro tensões elásticas, ocorrem uma mudança nas posições dos picos de difração. A magnitude da mudança corresponde a medida das tensões residuais presentes, e a direção das mudanças depende da natureza das tensões, trativas ou compressivas [9]. Esta técnica pode ser aplicada com equipamentos portáteis, contudo, apresentando uma redução na penetração, devido a menor intensidade do feixe incidente.

A técnica elasto-magnética baseia-se no princípio da anisotropia magnética causada por um campo de tensões. Devido a ação das tensões há uma alteração no campo magnético induzido inicialmente sobre a peça, esta alteração pode ser convertida em valores de tensão por ação do efeito "Barkhausen Noise". Este método é mais utilizado em ligas e metais ferromagnéticos e na realização de varreduras pela peça tensionada para identificação dos locais mais tensionados, pois os sinais são fortemente influenciados pela microestrutura e pela condição das tensões presentes [9].

A técnica ultra-sônica mede indiretamente o nível de tensões residuais através da variação da velocidade da onda ultra-sônica quando esta percorre um material

tensionado e pelo estabelecimento da constante acustoelástica do material inspecionado [9].

A Tabela 3.1 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens de alguns métodos para medição de tensões residuais [10].

MÉTODOS	Magnético	Ultra-Som	Raios-X	Furo-Cego
Vantagens	Portátil e fácil manuseio	Velocidade, fácil manuseio, medição de tensões internas	Metodologia estabelecida e precisa	Metodologia estabelecida e precisa
Desvantagens	Usado em materiais ferríticos; sensível a microestrutura do material	Não aplicável em cordões de solda; sensível a microestrutura do material	Necessita proteção a radiação; unidade deve ser fixa em relação ao componente	Semi- destrutuivo; resultados demorados
Penetração Máxima (mm)	1,0	Superficial: 1,0 Interna: 150	0,02	2,0
Parâmetro Medido	Permeabilidade Magnética	Variações da velocidade da onda ultra-sônica	Alteração na distância interplanar de materiais policristalinos	Deformação superficial ou deslocamento
Problemas para Análise em Materiais com Grão e Textura Grosseiros	Sim	Sim	Sim	Não
Sensitividade ao Endurecimento por Deformação	Alta	Alta	Alta	Baixa
Portabilidade	Sim	Sim	Sim	Sim
Precisão Normal	± 20,0MPa	± 20,0MPa	10,0 a 20,0MPa	10,0 a 20,0MPa

Tabela 3.1. Comparação entre métodos existentes de medição de tensões residuais[10].

3.4 – PROPAGAÇÃO DA ONDA CISALHANTE EM UM SÓLIDO HOMOGÊNEO

Um carregamento repentino, como o gerado por uma fonte ultra-sônica, representa basicamente um problema dinâmico. A ação da força aplicada não é transmitida instantaneamente a todas as partes do corpo, as ondas de tensão e deformação se propagam com velocidades finitas a partir da região carregada [11].

As equações de equilíbrio, que se aplicam essencialmente ao carregamento estático, devem ser substituídas por equações de movimento. Para pequenos

deslocamentos em sólidos elásticos isotrópicos infinitos ou semi-infinitos, basta acrescentar as forças de inércia às equações de equilíbrio.

A propagação de ondas está associada a expansão volumétrica e a rotação e distorção cisalhantes. Se a deformação produzida consiste apenas de distorção e rotação, sem expansão de volume as equações de movimento são simplificadas para a seguinte forma:

$$\begin{aligned} & G\nabla^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \\ & G\nabla^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \\ & G\nabla^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \end{aligned}$$

Onde p é a densidade do material e t é o tempo.

Estas são as equações para ondas equivoluminais ou ondas de distorção [11].

Uma perturbação num ponto de um meio elástico produz irradiação de ondas em todas as direções. Longe do ponto de perturbação as ondas podem ser consideradas ondas planas. Neste caso, se as ondas forem de dilatação, pode ser assumido que todas as partículas estão se movendo paralelas à direção de propagação; se as ondas forem de distorção, o movimento das partículas é perpendicular a esta direção. No primeiro caso, as ondas são chamadas ondas longitudinais, Figura 3.1(a), no segundo, elas são chamadas ondas transversais ou cisalhantes, Figura 3.1(b).



Figura 3.1. (a) Onda Longitudinal; (b) Onda cisalhante [12].

Para ondas cisalhantes se propagando na direção x, e com o deslocamento das partículas na direção y, u=w=0 e o deslocamento v é função apenas de x e t, então a partir da equação (3.1) tem-se:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} = \mathbf{c}_c^2 \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}^2}$$
 3.2

Onde c_c é a velocidade da onda cisalhante ao longo do eixo x, dada por:

$$c_{c} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$
 3.3

Onde G é módulo de cisalhamento e ρ é a densidade do meio.

Conhecendo a relação entre o módulo de cisalhamento com o módulo de elasticidade:

$$\frac{1+v}{E} = \frac{1}{2G}$$
 3.4

Onde E é o módulo de Young e *v* é o coeficiente de Poisson.

Substituindo G da equação (3.4) em (3.3), a velocidade da onda pode ser expressa em termos de E, v e ρ :

$$c_{c} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1-\nu)}}$$
 3.5

Como a análise da anisotropia acústica do material é baseada na variação da velocidade da onda ultra-sônica, foi apresentada uma forma resumida da obtenção da equação da velocidade da onda cisalhante, que será utilizada no presente trabalho.

3.5 – AVALIAÇÃO DE TENSÕES POR ULTRA-SOM

3.5.1 – Acustoelasticidade e Birrefringência

Já foi constatado que a velocidade das ondas ultra-sônicas, ao passar no interior de um sólido elástico tensionado, não era constante como seria em um sólido isotrópico. Esta variação da velocidade da onda ultra-sônica depende do estado de tensão do material e das direções dos planos cristalinos, os quais vão influenciar as direções de polarização e de propagação da onda ultra-sônica. Este fenômeno, da variação da velocidade da onda ultra-sônica ao passar através de um material elástico sob tensão, passou a ser chamado de efeito acustoelástico [13,14].

O fenômeno da birrefringência acústica pode ser explicado de forma análoga ao da birrefringência ótica. Quando um meio homogêneo é anisotrópico, um feixe de luz que o atravessa sofre uma dupla refração, gerando ondas que apresentam diferentes ângulos de polarização. Materiais que apresentam esta propriedade são chamados duplamente refratores ou birrefringentes [14].

A velocidade de ondas cisalhantes polarizadas em uma direção de tensão principal depende do nível de tensões atuando nesta direção. A birrefringência acústica tem sido usada porque esta técnica não requer o conhecimento da espessura da amostra analisada, e assim, reduz a medida a uma diferença no tempo de percurso da onda, o qual possibilita a obtenção da diferença das tensões atuando nas direções de polarização [13].

A teoria linear da elasticidade é geralmente adequada para descrever o comportamento elástico dos materiais, usando a lei de Hooke. Nesta abordagem, a energia de deformação elástica é desenvolvida para a segunda ordem de deformação e são introduzidas as constantes de Lame, $\lambda \in \mu$, para o caso de um meio isotrópico. Entretanto, somente foi possível a descrição teórica do efeito acustoelástico, que relaciona a influência do estado de tensão no material à velocidade da onda ultrasônica, considerando a teoria não linear da elasticidade. Murnaghan desenvolveu a conceituação da energia de deformação elástica para as deformações de terceira ordem e introduziu as constantes elásticas de terceira ordem (l, m e n que foram então chamadas constantes de Murnaghan) [14].

Tendo por base a teoria desenvolvida por Murnaghan em 1937, Hughes e Kelly [15] em 1953 desenvolveram as relações básicas entre a velocidade da onda ultrasônica e a deformação que surge devido a tensão no material onde essa onda se propaga.

O método funciona bem quando a propagação ocorre em um meio isotrópico. Se existe alguma anisotropia elástica causada pela microestrutura ou por uma orientação preferencial de grãos no material, a velocidade das ondas cisalhantes apresenta mudanças geralmente maiores do que as resultantes do efeito acustoelástico [13,16].

A equações desenvolvidas por Hughes e Kelly [15] podem ser representadas em termos da variação da velocidade da onda ultra-sônica em relação à tensão e podem ser apresentadas, de maneira genérica, da seguinte forma:

No caso de ondas cisalhantes,

$$\frac{V_{ij} - V_c^0}{V_c^0} = k_3 \sigma_i + k_4 \sigma_j + k_5 \sigma_k$$
 3.6

Onde V_c^0 é a velocidade da onda cisalhante no material sem tensão, V_{ij} é a velocidade de uma onda ultra-sônica propagando na direção i e polarizada na direção j, σ_i , σ_j e σ_k são as tensões principais nas respectivas direções e k_3 a k_5 são chamadas constantes acustoelásticas normalizadas. Cada constante acustoelástica corresponde a uma relação entre a direção de propagação da onda e a direção de polarização das partículas, em relação à tensão e são obtidas a partir da variação relativa da velocidade das ondas em um material tensionado uniaxialmente, assumindo variações muito pequenas.

Em um material isotrópico, sem efeito da tensão ou textura, a onda ultra-sônica incidindo perpendicularmente ao material, quando polarizada em duas direções perpendiculares retornará ao mesmo tempo. Quando neste material é aplicada uma tensão isso não ocorre e a equação genérica da onda cisalhante, mostrada anteriormente, equação 3.6, combinada para as duas direções, pode ser expressa da seguinte forma:

$$B = \frac{(V_{31} - V_{32})}{V_c^0} = (k_4 - k_5)(\sigma_1 - \sigma_2)$$
 3.7

Na aplicação da técnica ultra-sônica para avaliação da anisotropia acústica de um material, ao se utilizar ondas cisalhantes, o termo utilizado é o da birrefringência acústica. Definido como a diferença fracional da velocidade ou tempo de trânsito da onda ultra-sônica em relação a duas direções perpendiculares, como mostra a equação 3.8:

$$B = \frac{V_{1} - V_{t}}{\frac{V_{1} + V_{t}}{2}} = \frac{-(t_{1} - t_{t})}{\frac{t_{1} + t_{t}}{2}}$$
3.8

Onde t_i é o tempo de percurso da onda ultra-sônica com direção de polarização alinhada com a direção de laminação do material, t_t é o tempo de percurso da onda ultra-sônica com direção de polarização perpendicular a direção de laminação e B é a birrefringência.

Um material ortotrópico é aquele que tem propriedades de simetria elástica com relação a três planos cristalinos. Geralmente os materiais não são completamente ortotrópicos, o que pode influenciar na análise da variação da anisotropia acústica do material, pois efeitos como uma pequena variação na orientação cristalográfica do material podem causar uma anisotropia da mesma ordem que uma produzida por tensão.

No caso em que a tensão cisalhante for igual a zero e as direções das tensões principais coincidirem com a direção de simetria ortotrópica do material, as equações anteriores são reduzidas a:

$$\mathsf{B} = \mathsf{B}_0 + \mathsf{m}(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{3.9}$$

Onde B é a birrefringência induzida pela textura e pelo estado de tensões do material, B_0 é birrefringência induzida pela textura, m é a constante acustoelástica do material [14].

3.5.2 – Aplicações da Técnica Ultra-sônica para Medições de Tensão

Em vista do uso da técnica ultra-sônica ao se empregar as medidas do tempo de percurso da onda em aplicações como na avaliação de porosidade em materiais cerâmicos, na determinação da direção de laminação e, do tamanho de grão de materiais metálicos e na caracterização do estado de tensões em materiais, uma medida precisa do tempo de percurso da onda ultra-sônica precisa ser feita, especialmente no caso da determinação de tensões em materiais, onde as variações são na ordem de nanosegundos [17]. Com o intuito de vencer essa barreira para a aplicação da técnica ultra-sônica na avaliação de tensões, Bittencourt *et al* [17] desenvolveram uma metodologia para medição do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas. Foi empregando o processamento do sinal ultra-sônico gerado, utilizando um algoritmo de correlação cruzada e a técnica multitaxas para aumentar a resolução das medidas [14,17].

Os autores utilizaram uma configuração pulso-eco, onde um único transdutor é utilizado como emissor/receptor e o sinal adquirido corresponde a uma sucessão de ecos provenientes da face oposta a qual o transdutor está acoplado. O tempo de percurso da onda é o tempo medido entre dois ecos consecutivos.

O algoritmo da correlação cruzada utilizado na realização das medidas se baseou na divisão do sinal adquirido com dois ecos, de maneira a gerar dois sinais, em parte idênticos. Um dos sinais gerados era formado apenas pelo primeiro eco do sinal adquirido e o outro pelo sinal completo. O resultado da correlação cruzada corresponde ao atraso entre os dois ecos. A defasagem entre os sinais, nesse caso, corresponde ao tempo de percurso que a onda ultra-sônica levou na sua propagação através da espessura do material. O aumento da taxa de amostragem foi realizado interpolando pontos entre dois pontos do sinal original obtido no osciloscópio empregando-se a técnica multitaxas [14,17].

Para avaliar a eficiência do método utilizado, as medidas de tempo obtidas pelo sistema ultra-sônico composto por computador, osciloscópio, gerador de pulso ultra-sônico e atrasador de sinal ultra-sônico foram comparadas com os resultados obtidos por um analisador de tempo com precisão de picossegundo. A comparação entre as medidas obtidas pelos dois sistemas mostrou que o método desenvolvido foi 100% eficiente na medida de tempo de percurso da onda ultra-sônica quando se emprega o maior fator de interpolação do sinal [14,17].

Para garantir que o processamento do sinal ultra-sônico utilizado fosse utilizado com sucesso em avaliações de tensão, foi realizado um ensaio de tração uniaxial utilizando uma liga de AIMg carregada até 3600Kgf. Durante esse ensaio foram realizadas medidas de tempo de uma onda com direção de polarização perpendicular à direção de carregamento. Com esse ensaio esperava-se encontrar o comportamento linear existente entre o tempo de percurso e a tensão aplicada no material. Os resultados obtidos com a técnica envolvendo correlação cruzada e interpolação multitaxas permitiram a medição do tempo de percurso da onda ultrasônica com resolução suficiente para verificar tensões atuantes em materiais [17].

A disponibilidade de transdutores capazes de gerar ondas cisalhantes em componentes e a possibilidade de se medir o tempo de percurso de ondas ultrasônicas com precisão suficiente, possibilitam a utilização da birrefringência acústica

para caracterizar o estado de tensões residuais e o grau de textura de materiais laminados. Ambas as tensão e textura causam uma anisotropia elástica no componente [18].

A técnica ultra-sônica permite a análise de estados de tensão e textura não apenas na superfície, mas também ao longo de toda a espessura de um componente. Uma grande vantagem da técnica ultra-sônica é a sua rápida e fácil aplicação além da possibilidade da realização de medidas em campo com a utilização de equipamentos portáteis [18]. Diferentes técnicas são distinguidas de acordo com a onda ultra-sônica utilizada ou, pela combinação de ondas usadas para uma dada aplicação. A birrefringência acústica é particularmente empregada para determinar a textura e o estado tensões ao longo da espessura de componentes.

Schneider [18] utiliza a birrefringência acústica para determinar o estado de tensões em rodas de trem. As medidas de tempo de percurso de duas ondas cisalhantes propagando pela espessura foram tomadas em duas direções, a primeira, com a onda vibrando na direção do diâmetro, e a segunda, vibrando na direção circunferencial (tangencial). Os resultados foram obtidos na forma da diferença das tensões σ_{tan} - σ_{rad} , onde σ_{tan} é a tensão principal na direção tangencial e σ_{rad} é a tensão principal na radial.

O estado de tensões de rodas novas antes e após frenagens foi caracterizado. A diferença das tensões principais foi avaliada em diferentes profundidades a partir da extremidade da roda. Foi notado que para rodas novas, a diferença entre as tensões principais se encontra com baixos valores compressivos. Conforme as frenagens vão ocorrendo, o perfil das tensões passa de compressivo para trativo [18].

Segundo Schneider [18], a aplicação da birrefringência acústica para caracterizar estados de tensão em componentes geralmente não permite a avaliação de cada tensão principal. Esta desvantagem pode ser compensada pelas seguintes vantagens:

- O tempo de percurso da onda ultra-sônica é a única medida necessária. Não é preciso saber a espessura do componente de interesse. Além disso, mudanças microestruturais ao longo da direção de propagação influenciam a velocidade das ondas cisalhantes polarizadas de forma perpendicular entre si da mesma maneira, portanto, a birrefringência acústica não é influenciada;
- Em componentes onde a espessura é pequena quando comparada com as outras dimensões, a tensão principal ao longo da espessura pode ser desconsiderada. O conhecimento da diferença entre as duas outras tensões principais é suficiente para considerações de mecânica da fratura;

A constante acustoelástica é uma função somente de duas constantes do material (μ e n)

Nos casos onde a birrefringência acústica é utilizada para determinação do estado de tensões presentes no material, é necessário o conhecimento da constante acustoelástica do material. Esta pode ser obtida de acordo com a equação proposta por Schneider [18]:

$$m = \frac{8\mu^2}{4\mu + n}$$
 3.10

Onde μ é uma das constantes elásticas de segunda ordem do material, também chamadas de constantes de Lamé, e n é uma das constantes elásticas de terceira ordem do material, também chamadas de constantes de Murnaghan.

Em casos onde não se possui o valor das constantes elásticas do material para aplicação direta da fórmula da constante acustoelástica, essa pode ser obtida de forma experimental através de um ensaio de tração uniaxial. Durante o ensaio são realizadas medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica em duas direções de polarização, na do carregamento e uma perpendicular a do carregamento de modo que a birrefringência acústica possa ser calculada para cada nível de tensão aplicada ao material durante o ensaio, até o início do escoamento. A partir dos resultados obtidos, é gerado o gráfico de Birrefringência *versus* Tensão, que no caso de aços apresenta um comportamento linear onde o valor coeficiente angular da reta obtida no ensaio é o valor da constante acustoelástica do material.

Um sólido policristalino consiste de grãos com orientações cristalográficas distribuídas aleatoriamente, de modo que este apresenta, em sua distribuição global, propriedades elásticas isotrópicas.

Durante os processos de fabricação, devido às operações mecânicas as quais são submetidos, os materiais passam a apresentar uma orientação cristalina preferencial, a textura, o que a exemplo das tensões, também, os torna acusticamente anisotrópicos [14].

A textura dos materiais aparece como um problema para a técnica ultra-sônica de medição de tensões, uma vez que influencia a velocidade da onda ultra-sônica na mesma ordem de grandeza que as tensões. São necessários esforços na tentativa de separar os efeitos da textura dos da tensão.

Alguns autores vêm tentando vencer esse obstáculo à utilização da técnica em aplicações onde os materiais que deram origem ao componente avaliado sofreram

níveis elevados de deformação plástica. Hirao & Pao [19] avaliaram o efeito acustoelástico devido a ação de tensões residuais e deformações plásticas. Para isso os autores avaliaram as medidas de tempo de percurso de duas ondas ultra-sônicas cisalhantes polarizadas ortogonalmente viajando pela espessura de uma tira de alumínio que foi deformada plasticamente por flexão a quatro pontos.

Em sua abordagem do problema, esses autores propõem a separação de dois efeitos, a anisotropia original que corresponde à textura (ou orientação preferencial dos grãos) que foi imposta durante uma elevada deformação plástica, como uma laminação ou conformação mecânica do material, e o que eles denominaram de "efeito textura", o qual ocorre quando uma de deformação plástica é gerada de forma heterogênea, como no caso de um encruamento ou aquecimento. Mesmo que numa pequena ordem, essa deformação pode não alterar totalmente a anisotropia original, mas ela pode resultar numa pequena alteração na anisotropia acústica do material devido a reorientação e alongamento preferencial de grãos e provavelmente, empilhamento de discordâncias [19].

Foram medidos 31 pontos ao longo da espessura de uma tira de uma liga 6061-T6 de alumínio com 22x51x305mm usinada a partir de uma placa. Os valores foram obtidos antes do ensaio de flexão, após a deformação plástica e após um corte realizado na tira para que ocorresse o alívio de tensões residuais inseridas devido a deformação plástica. Dessa forma, o "efeito textura" pôde ser separado do efeito causado pelas tensões residuais geradas a partir do dobramento da tira. As tensões medidas apresentaram valores próximos aos obtidos por técnicas destrutivas utilizando strain-gages.

Ao avaliarem as fórmulas utilizadas para avaliação de tensões residuais, utilizando a birrefringência acústica, Hirao & Pao [19] propõem uma nova formulação para estender a aplicação da técnica nos casos onde os efeitos das deformações plásticas não podem ser excluídos. Os autores chegaram a seguinte formulação:

$$B = B_0 + \Delta B_1(e^p) + m(\sigma_1 - \sigma_2)$$
 3.11

Onde B é a birrefringência induzida pela textura original, pelas deformações plásticas e pelo estado de tensões do material, B_0 é birrefringência induzida pela textura, ou seja, a anisotropia original, $\Delta B_1(e^p)$ é o efeito causado pelas deformações plásticas não homogêneas (efeito textura) e m é a constante acustoelástica do material.
Para determinar o efeito das deformações plásticas a partir das formulações propostas, a birrefringência acústica da tira foi medida antes do dobramento, esse valor corresponde a B₀, a anisotropia original do material.

Após o dobramento da tira, as tensões residuais surgem no material devido a constrições resultantes das deformações plásticas não homogêneas. Tanto as tensões residuais como a mudança na textura devido às deformações plásticas alteram a birrefringência acústica, B, da equação 3.11.

Com o corte da tira, assume-se que ocorreu o alívio completo das tensões residuais, dessa forma, a equação 3.11, passa a ser expressa da seguinte maneira:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \Delta \mathbf{B}_1(\mathbf{e}^p) \qquad \qquad 3.12$$

Dessa forma, o "efeito textura" pode ser calculado a partir da subtração dos valores de birrefringência acústica obtidos antes do dobramento, B₀, e após o alívio de tensões, B [19].

Os resultados obtidos da subtração da birrefringência inicial da birrefringência da tira após o dobramento para o cálculo das tensões residuais apresentaram um elevado espalhamento assim como uma assimetria nos valores de tensão, indicando que o efeito textura causado pela deformação plástica não pode ser negligenciado nesses casos.

Na análise dos resultados obtidos da subtração dos valores entre a birrefringência inicial e a do estado após o alívio de tensões, o comportamento apresentou-se mais correto, pois coincidiu mais com os resultados calculados e com os obtidos por strain-gages.

Combinando os resultados de deformação plástica com as diferenças de birrefringência entre os estados antes do dobramento e após o alívio de tensões, os autores observaram que apesar do espalhamento dos resultados devido a erros experimentais, o comportamento do efeito textura é aproximadamente uma função linear da deformação plástica compressiva.

Os resultados obtidos por Toda *et al* [20] para três metais policristalinos, e o observado por Hirao & Pao [19] mostram que o "efeito textura" se comporta como uma função linear da deformação plástica, para valores menores que 2% de deformação. Para alumínio puro e aços carbono (0,17%C), o mesmo comportamento linear é observado para tensões trativas e compressivas, conforme o predito pela equação 3.11. Já no caso de cobre puro e da liga de alumínio 6061-T6, um comportamento linear é observado, mas este se difere quando as tensões são compressivas ou

trativas de forma que dois valores para o coeficiente B1, na equação 3.11 seriam necessários, um para tração e outro para compressão.

O trabalho de Hirao & Pao [19] mostra claramente que, se o "efeito textura" não for descontado de forma correta das medições de birrefringência acústica de componentes que sofreram deformações plásticas, de forma heterogênea, as medidas de tensão obtidas por ultra-som apresentarão erros sérios, podendo colocar em risco uma avaliação baseada nestas medidas.

A identificação de regiões deformadas plasticamente em componentes industriais é de suma importância na avaliação da integridade dos mesmos. Com a intenção de detectar e caracterizar essas regiões em grandes estruturas, Panetta & Alers [21] apresentam em seu trabalho uma ferramenta para essa função baseada na técnica ultra-sônica.

Os autores realizaram medidas de atenuação, velocidade de ondas longitudinais e de birrefringência acústica em um corpo-de-prova de um aço do tipo A36 deformado por tração até 20%, desenvolvendo uma região de deformação severa, inclinada em relação ao eixo de tração em 60 graus. Outros corpos de prova utilizados no trabalho foram retirados de um tubo utilizado para transporte de óleo e gás, três de cada uma das amostras obtidas do tubo foram submetidas a 5%, 10% e 12,5% de deformação, respectivamente.

As medidas de atenuação não variaram significativamente ao longo do eixo de tração dos corpos de prova deformados plasticamente, indicando que qualquer alongamento sofrido pelos grãos não alterou significativamente o espalhamento do feixe ultra-sônico [21].

A velocidade de ondas longitudinais foi determinada a partir da diferença do tempo de percurso entre o primeiro, segundo e terceiro ecos ultra-sônicos. A velocidade mostrou-se relativamente uniforme nas regiões do corpo-de-prova que tiveram contato com as garras da máquina de tração, nas regiões que sofreram deformações uniformes ocorreu uma pequena redução da velocidade em relação a região citada anteriormente. Já na região de maior deformação a velocidade sofreu uma queda significativa [21].

Para a detecção e a caracterização de regiões plasticamente deformadas numa estrutura, como uma tubulação, por exemplo, a espessura não pode ser assumida como uma constante, dessa forma, a aplicação prática da medida da velocidade de ondas longitudinais fica comprometida. Assim, a utilização da birrefringência acústica ganha espaço para essa aplicação, pois como já citado anteriormente, esta é definida como a diferença fracional do tempo de percurso de

duas ondas cisalhantes polarizadas de forma ortogonal em um mesmo ponto do material.

Ao contrário de Hirao & Pao [19], que utilizaram transdutores piezelétricos desenvolvidos em laboratório, Panetta & Alers [21] utilizaram transdutores eletromagnéticos, mais conhecidos como EMAT's.

Para tentarem entender melhor a relação entre tensão e textura, os autores realizaram as medidas de birrefringência no ponto central dos corpos de prova obtidos do tubo, durante um carregamento trativo. Foi notado que os valores do parâmetro foram diminuindo conforme o carregamento aumentava até atingirem valores negativos, uma mudança ocorreu quando o material começou a se deformar plasticamente, de modo que os valores começaram a aumentar até atingirem valores positivos. Ao final da retirada da carga imposta no ensaio, o valor da birrefringência apresentou-se maior do que no início do ensaio, a proporção dessa diferença nos valores de birrefringência depende do nível de deformação plástica imposta ao material durante o ensaio. Como a deformação plástica foi imposta de forma homogênea aos corpos de prova, assume-se que a alteração nos valores de birrefringência está relacionada a mudanças na textura do material.

Em um outro trabalho, Alers & McColskey [22] observaram o mesmo comportamento em corpos de prova obtidos de tubos para transporte de óleo e gás. Ao realizarem ensaios aumentando os níveis de deformação plástica, esses autores notaram que os valores de birrefringência ao final do ensaio aumentavam de forma linear com o aumento de deformação plástica inserida no material, o mesmo comportamento foi observado por Hirao & Pao [19]. Mas, ao avaliarem o comportamento dos coeficientes angulares das curvas de carregamento e de retirada de carga, ou seja, as constantes acustoelásticas dos materiais, puderam notar que esta se manteve constante em todos os ensaios, sendo independentes das deformações plásticas.

Esta observação não é surpreendente, pois a deformação plástica impõe um certo rearranjo dos grãos no material, a textura do material (B_0) é alterada, daí um valor diferente ao se medir a birrefringência após o ensaio. Já o valor da constante acustoelástica não muda, pois está relacionado ao comportamento do material durante o carregamento no regime elástico, portanto, durante a retirada da carga, a constante vai apresentar o mesmo comportamento que durante o carregamento.

Panetta & Alers [21] também realizaram medidas de birrefringência no corpode-prova do aço A36 com 20% de deformação plástica. Foi observado que a birrefringência se comportava de forma homogênea até a região que sofreu maior deformação plástica, nesta região foi observada uma redução brusca no valor do

parâmetro. Como a região de deformação mais severa apresentou certo ângulo em relação ao eixo de tração, é razoável admitir que nesta região o valor da birrefringência seja função das tensões residuais e das mudanças na textura.

Com base nas informações obtidas na literatura, é possível afirmar que a técnica ultra-sônica possibilita a identificação de regiões deformadas plasticamente, sendo que nessas regiões, o valor da birrefringência corresponde a uma soma de contribuições vindas das alterações na textura do material devido às deformações plásticas e das tensões residuais geradas no material ao final da deformação. O desafio atual continua sendo descobrir uma forma não destrutiva de se separar esses dois efeitos, para então possibilitar a aplicação da técnica para medição de tensões residuais em componentes deformados plasticamente.

Alers & McColskey [22] propuseram o uso de ondas SH para a separação desses efeitos, pois estas ondas possuem a característica de que ao se propagarem ao longo de eixos assimétricos de textura, não existe uma mudança na velocidade de fase quando as direções de polarização e propagação são trocadas. Esta característica é removida pela presença de um estado de tensões e a diferença na velocidade das ondas é proporcional ao estado de tensões. Assim, os autores puderam reescrever a equação que utiliza a birrefringência para medir tensões residuais da seguinte forma:

$$B = K\sigma \qquad \qquad 3.13$$

Onde, B é a Birrefringência acústica obtida da mesma forma que a obtida com o uso de ondas cisalhantes, porém nesse caso, o cálculo é realizado utilizando o tempo de percurso de duas ondas SH em um mesmo ponto polarizadas de forma ortogonal. K é a constante acustoelástica e σ é a tensão trativa na direção axial.

Esta equação torna-se útil, pois elimina o temo B0 da equação original e porque o valor da constante K é igual a (1/2G), onde G é o módulo de cisalhamento do material.

Durante os testes para validar a equação 3.13, foram utilizados EMAT's acoplados em direções perpendiculares para se obter as medidas de tempo nas duas direções de forma simultânea em um corpo-de-prova submetido a um ensaio de tração para se obter o valor da constante K e então comparar com o valor teórico da mesma. Os resultados foram decepcionantes, pois os valores de K obtidos no ensaio de tração estavam bem distantes do teórico, e notou-se que a constante acustoelástica era sensível ao passado magnético da amostra ensaiada. Outra possibilidade para o erro

detectado no ensaio pode ser associada ao uso de dois EMAT's medindo tempos em pontos diferentes do material.

Assim, a equação não pôde ser usada sem uma modificação que separasse efeitos de textura e tensão. Possivelmente os erros obtidos na constante K estavam relacionados aos transdutores eletromagnéticos.

Panetta *et al* [23] observaram que as mudanças nos valores de birrefringência acústica aumentavam conforme os níveis de deformação plástica aumentavam, indicando que a birrefringência é diretamente relacionada ao grau de deformação plástica nos corpos de prova submetidos a ensaios de tração uniaxial. Os resultados medidos de birrefringência estão de acordo com os obtidos pelo método de elementos finitos que previu regiões de maiores deformações plásticas, justamente nessas regiões dos corpos de prova foram medidos os maiores valores de birrefringência acústica.

3.6 – TENSÕES RESIDUAIS EM TUBOS

O processo de fabricação, o processamento térmico, processos de soldagem, tratamentos térmicos e conformação mecânica são as fontes mais usuais de tensões residuais nos materiais. Pois essas operações implicam na ocorrência de deformações plásticas, que atuam no surgimento de tensões residuais nos componentes. Estas tensões podem afetar de modo determinante a vida em serviço de componentes e estão presentes em praticamente todo componente manufaturado ou estrutura montada. Os processos de fabricação de tubos envolvem praticamente todas as etapas citadas anteriormente [24].

As tensões residuais em tubulações de óleo e gás são de importância especial, pois estas são projetadas com fatores de segurança menores do que os utilizados nos outros componentes de engenharia, 25% [25]. Tensões residuais em tubulações podem contribuir em falhas por fadiga, trincamentos devido ao fenômeno de corrosão sob tensão, fratura do componente ou causar deformações inaceitáveis nas tubulações.

Se existe uma microestrutura uniformemente recristalizada no aço utilizado para a fabricação do tubo, então pouca ou nenhuma tensão residual seria esperada nesse material.

Tubulações modernas de gás são essencialmente vasos de pressão, operando em até 70% do limite de escoamento do material utilizado. Conforme elas vão

envelhecendo, podem desenvolver defeitos associados a corrosão localizada ou generalizada e trincas induzidas por efeitos ambientes

Recentemente a ênfase na inspeção de tubulações tem mudado da simples detecção de defeitos para estimativas de perdas de espessuras dentro de 10%. Esta capacidade permite que cálculos para as novas condições de trabalho sejam feitos baseados em resultados de vazamento de fluxo magnético [26].

O estado de tensões do tubo é importante porque um excesso de tensões no material pode apresentar conseqüências sérias. Tensões residuais fazem uma contribuição significativa para a pressão total num tubo pressurizado, pois a combinação das tensões residuais com as tensões de serviço pode exceder localmente a tensão máxima do material. Este fator pode ser crucial em regiões onde os defeitos atuam como concentradores de tensão [26]. As tensões residuais são geralmente elevadas e em alguns casos com valores aproximados do limite de escoamento, porém seus efeitos não são evidentes até a estrutura ser completamente carregada ou exposta ao ambiente de trabalho. Tensões residuais trativas na superfície são indesejáveis, pois elas aumentam a susceptibilidade do componente a sofrer danos por fadiga, corrosão sob tensão e até mesmo fratura.

Tubos enterrados para transporte de óleo e gás estão sujeitos à pressão interna do fluido, movimentação do solo e ataques do meio ambiente, que podem levar a danos, principalmente se houver algum tipo de falha no recobrimento passivo do tubo. As principais causas desse dano são os mecanismos de corrosão sob tensão, redução na espessura da parede e a presença de concentradores de tensão [24].

Dutos para transporte de óleo e gás também estão submetidos a esforços de fadiga de longo ciclo. Estados trativos de tensões residuais tendem a reduzir a vida em fadiga dos componentes, enquanto compressivos tendem a aumentar a vida em fadiga.

De mão das informações acima, verifica-se que além do estado estrutural é importante verificar o estado de tensões residuais gerado durante a fabricação de tubos. Entretanto, na literatura, não foram encontrados muitos relatos abordando o tema.

Tanto as tensões residuais geradas durante o processo de fabricação e a corrosão em serviço reduzem a habilidade do material de resistir aos carregamentos internos e externos [24].

Devido às ações de tensões circunferenciais e também de tensões devidas ao dobramento, induzidas pelo deslocamento radial, o estado de tensões residuais de uma peça circunferencial se torna diferente daquele de uma peça plana.

As tensões residuais longitudinais em tubos são geralmente resultado das tensões oriundas do dobramento [27]. Alguns autores [28] supõem que o padrão de tensões residuais induzidas pela soldagem de chapas planas seria modificado pela relaxação elástica devida à deformação radial do tubo.

Na investigação do efeito das tensões residuais, dois fenômenos e suas interações merecem ser avaliados [2] São estes:

- > A influência da tensão residual na resistência e no limite de fadiga;
- A influência das tensões induzidas por carregamento na magnitude das tensões residuais.

Na superfície interna do tubo as tensões residuais circunferenciais e longitudinais, próximas ao cordão, são trativas e próximas do limite de escoamento, estas tendem a se tornarem compressivas e até atingirem valores nulos conforme há um afastamento do centro do cordão. Na superfície externa do tubo, as tensões residuais longitudinais se comportam de maneira simetricamente oposta às da superfície interna, isto é, com valor absoluto próximo, mas, nas proximidades do cordão, são compressivas [27, 29].

As tensões residuais circunferenciais na superfície externa são em geral compressivas e se comportam de forma aleatória [27, 29].

Mello [2] realizou um trabalho abordando os efeitos das etapas de fabricação de tubos com costura no perfil das tensões residuais geradas no produto final. Neste estudo, o autor avaliou as etapas de fabricação de tubos API 5L-X70 pelo processo UOE – SAW, sendo que a técnica utilizada para a avaliação das tensões residuais foi a da difração de raios-x, o resultado final indicou que o estado final de tensões residuais era compressivo, o que pode ser benéfico à resistência a fadiga para estes tipos de tubos.

Com o objetivo de caracterizar a textura cristalográfica e medir as tensões residuais numa amostra de um tubo de aço X-70 com 610mm de diâmetro e 9mm de espessura de parede, obtido pelo processo de fabricação UOE – SAW, Clapham *et al* [26] utilizaram as técnicas de difração de raios-X para determinar a textura cristalográfica e difração de nêutrons para medição de tensões residuais.

O tubo foi cortado em duas regiões, um corte pela região da solda e o outro realizado a 180º da solda. Um defeito do tipo corrosão por pites foi simulado na parede externa do tubo. A região em volta do furo foi selecionada para a avaliação das tensões residuais.

Durante o corte do tubo foi possível notar um recuo do material de aproximadamente 6,7mm, este recuo está associado ao alívio da tensão circunferencial compressiva presente na superfície externa da parede do tubo.

No tubo estudado, as tensões residuais foram calculadas a partir das deformações residuais feitas nas direções circunferencial, longitudinal e transversal (direção de espessura).

A textura da amostra foi determinada usando figuras de pólo obtidas por difração de raios-X. Os resultados da textura mostraram que existem diferenças de textura entre o centro e as superfícies da parede do tubo, provavelmente por que durante os passes finais da laminação a temperatura da chapa utilizada para se fabricar o tubo era muito baixa para permitir a recristalização nas superfícies externas, uma situação indesejada na indústria.

Sem o alívio de tensões obtido na forma de recristalização, estas superfícies externas da chapa, posteriormente transformada em tubo, continuam num estado de tensões residuais compressivas, o que é consistente com os resultados obtidos para tensões residuais medidas na direção axial do tubo.

Os resultados das medições nas direções circunferencial, longitudinal e transversal na posição próxima ao defeito não foram diferentes dos obtidos nos pontos mais distantes. Das três direções avaliadas, o gradiente de tensões residuais mais significativo ocorre na direção longitudinal, com uma tensão fortemente compressiva de 100MPa na superfície externa, aumentando levemente para tensão trativa e finalmente zero, próximo à superfície interna da parede do tubo. Já as tensões nas direções circunferencial e transversal mantiveram-se trativas. As tensões residuais compressivas na superfície externa nesse tipo de tubo estão de acordo com as medidas por Mello [2].

A análise metalográfica corroborou para afirmação de que a tensão residual compressiva observada na superfície externa estava associada com a microestrutura deformada da chapa que deu origem ao tubo estudado. A origem desta deformação não foi determinada, mas pode ter sido causada por um dos pares de rolos de laminação girando a uma velocidade levemente superior do que os outros causando um defeito do tipo "enrugamento". Como a temperatura na superfície da placa estava abaixo da temperatura de recristalização, a tensão compressiva resultante do defeito não pôde ser aliviada. Esta deformação periódica na superfície foi provavelmente responsável pela significativa variação das tensões axial e circunferencial ao longo da superfície externa do tubo.

Com a afirmação acima, nota-se claramente como o controle na fabricação dos materiais utilizados possui uma grande influência no perfil de tensões residuais gerado no produto final, neste caso, o tubo.

Em trabalho mais atual, Amirat *et al* [24] realizaram experimentos para caracterizar a distribuição de tensões residuais pela espessura da parede de tubos sem costura. Os resultados dos ensaios foram inseridos num modelo mecânico-probabilístico, onde o modelo das tensões residuais é acoplado ao modelo de corrosão. Como tensões radiais e cisalhantes não são consideradas para tubos de parede fina, considerou-se que as tensões residuais afetando a estrutura do tubo eram as tensões circunferenciais e longitudinais [24], pois as falhas geralmente ocorrem na direção longitudinal, sob ação das tensões circunferenciais. A confiabilidade dos tubos foi então avaliada por diferentes taxas de corrosão variando da atmosférica até um processo de corrosão ativo.

A medição das tensões residuais foi realizada em amostras de 450mm de comprimento, cortadas de um tubo sem costura com 219mm de diâmetro externo e espessura de parede de 12,7mm. Para a determinação das tensões residuais, 10 amostras foram preparadas de maneira que os tubos apresentassem uma redução gradual nos valores de espessura de um tubo para o outro, de 12,7 a 2mm. As operações de remoção de camada foram realizadas através de usinagem.

Para realizar as medidas de deslocamento e deformações residuais durante o processo de corte, os autores construíram um dispositivo permitindo que o tubo fosse preso pela sua parte inferior, de modo que a parte superior pudesse ser cortada. Dessa maneira, foi assegurada uma condição de deslocamento livre para todos os pontos do tubo, exceto os da parte inferior, enquanto o entalhe ia sendo feito ao longo da direção axial do tubo. Cada passe de corte era seguido por medições de deslocamento e deformação. As medidas de deslocamento foram feitas com a utilização de quatro relógios comparadores para gravar as mudanças no diâmetro e as medidas de deformação foram obtidas através de strain-gages colados no tubo, tanto na superfície externa quanto na interna.

O primeiro efeito das tensões residuais foi observado no comportamento dos tubos após a etapa de corte. Nos tubos cortados na condição como recebido, o processo de corte produziu uma abertura repentina acompanhada por um som, isto foi devido ao tubo procurar uma forma para acomodar a deformação aliviada até obter a sua forma final. Para espessuras reduzidas de 12,7 até 7,8mm, os tubos comportaram-se da maneira explicada anteriormente. Tubos com espessura de parede variando de 7,8 a 2mm apresentaram um comportamento exatamente oposto, resultando num fechamento dos tubos após a etapa de corte. Conseqüentemente,

para tubos com paredes de maior espessura, as camadas externas da parede se encontram em tração, resultando num aumento do diâmetro após o corte, enquanto as camadas internas da parede se encontram em compressão, levando a uma redução no diâmetro após o corte. O comportamento dos tubos sem costura com maiores espessuras de parede foi contrário ao observado por Clapham *et al* [26] que ao cortarem um tubo com 9mm de espessura de parede, obtido pelo processo UOE – SAW, notaram uma redução no diâmetro do tubo.

Isto mostra como diferentes espessuras e diferentes processos de fabricação de tubos podem gerar distribuições de tensões residuais distintas umas das outras.

Amirat *et al* [24] obtiveram as distribuições de tensões residuais circunferenciais ao longo da espessura de 10 (dez) tubos com diferentes valores de espessura de parede, usando o ajuste linear de Crampton.

O ajuste dos resultados leva a uma distribuição das tensões residuais em função da espessura da amostra. Nas faces da parede do tubo, as tensões residuais máximas observadas foram ± 70MPa. Este ajuste linear permitiu descobrir um estado de equilíbrio entre tensões residuais trativas e compressivas.

Quando as camadas corroídas são removidas, o relaxamento das deformações residuais ocorre, causando uma redistribuição das tensões residuais.

A análise de confiabilidade do tubo sob essas condições foi realizada utilizando o software PHIMECA, que permite calcular o índice de confiabilidade β, que varia de 0 a 10, sendo esse último valor o de maior confiabilidade. Além do índice β, é possível calcular a probabilidade de falha quando a pressão interna é super estimada. Nesta avaliação paramétrica da confiabilidade, os autores obtiveram as seguintes variáveis como as mais importantes para a confiabilidade dos tubos em operação: tensão de escoamento, espessura, pressão interna, raio interno e tensões residuais [24].

Law *et al* [25] mediram as tensões residuais por difração de nêutrons em três tipos de amostras: chapas de aço que seriam usadas na fabricação de tubos pelo processo ERW; pedaços de tubos obtidos pelo mesmo processo e, tubos soldados para compor uma tubulação para transporte de gás, também obtido pelo processo ERW. Tanto as tiras quanto os tubos eram de aço X70, nas seguintes espessuras: 5,4; 6,4 e 7,1mm.

No processo de fabricação de tubos com costura oriundos de chapas de aço, o aço utilizado para obtenção do tubo passa por uma série de operações de laminação com temperaturas controladas, ao final do processo de laminação, o aço é conformado para se formar uma bobina. No momento da fabricação do tubo é preciso desfazer a bobina e formar uma tira para que essa seja conformada e soldada para se obter o tubo. Deformações elásticas e plásticas ocorrem durante essa etapa. Law *et al* [25]

sugerem os seguintes perfis de tensões residuais durante as três etapas principais do processo de fabricação ERW, pois estas introduzem diferentes ciclos de deformação nas paredes externa e interna do tubo. Da conformação da bobina em uma tira e da tira à forma tubular, a parede interna sofre compressão e a externa tração; da forma tubular após a conformação mecânica à realização da solda longitudinal no tubo, ambas as paredes do tubo se encontram em compressão e; na etapa do teste hidrostático ao final da fabricação do tubo, o ciclo de deformação tanto na parede interna quanto na externa é de tração [25]. Geralmente a tensão de escoamento na direção longitudinal é menor do que na direção radial do tubo, um sinal claro da anisotropia criada no material durante a fabricação do tubo.

As medidas foram realizadas sem o corte dos tubos, ao contrário de Amirat *et al* [24] que realizaram suas medidas de tensões residuais em tubos sem costura a partir das deformações de deslocamentos causados pelo alívio das tensões residuais após etapas de cortes nos tubos. Sem realizar cortes nos tubos, Law *et al* [25] preservaram o campo de tensões residuais nos tubos avaliados por difração de nêutrons.

Os resultados das medições na tira indicam que as tensões residuais geradas nesta etapa do processo de fabricação são devidas a conformação do aço que sai da bobina para ser conformado em uma tira, esta etapa envolve uma considerável deformação plástica no material. As tensões na direção longitudinal do tubo apresentaram maiores valores, variando de –150MPa a 200MPa, com um comportamento oscilatório ao longo da espessura da parede da tira, esses resultados estavam de acordo com as previsões de Law *et al* [25]. A tensão circunferencial apresentou o mesmo perfil que a tensão residual longitudinal, mas com valores menores do que 50MPa ao longo da espessura.

Nos pedaços de tubos, as tensões residuais na direção longitudinal também foram maiores do que as na direção circunferencial, porém desta vez, o perfil das tensões residuais apresentou uma quase linearidade em ambas as tensões medidas. Variando de –400MPa na parede interna do tubo a 400MPa na parede externa, na direção longitudinal, e de –200MPa na parede interna do tubo a 100MPa na parede externa, para direção circunferencial. O perfil de tensões compressivas na parede interna e de tensões trativas na parede externa é associado a etapa de dobramento do tira para um formato circular. Neste caso as medidas obtidas também ficaram de acordo com o modelo proposto pelos autores para o perfil das tensões residuais ao longo da espessura dos tubos.

Nas soldas dos tubos unidos para se formar uma tubulação, as tensões variaram de 447 a 589MPa na direção circunferencial em função da espessura, sendo

o menor valor obtido nos tubos com menor espessura de parede, já as tensões residuais na direção axial variaram de 486 a 394MPa, sendo que, nesse caso, o maior valor foi obtido nos tubos de menor espessura.

Segundo os resultados obtidos por Law *et al* [25], as tensões residuais na direção longitudinal dos tubos se encontravam entre 60 e 80% do limite de escoamento do material empregado. Como tensões nessa direção exercem efeitos mais críticos em trincas de soldas de união de tubos numa tubulação, a prática de se assumir tensões residuais na ordem do limite de escoamento do material para cálculos de tamanho mínimo de defeitos, levaria a um tamanho mínimo muito conservativo, podendo condenar muitas soldas aceitáveis para reparo, aumentando assim os custos de construção e tempo.

Em um segundo trabalho utilizando a técnica da difração de nêutrons para medição de tensões residuais em tubos obtidos pelo processo ERW, Law *et al* [30] apresentam resultados semelhantes aos de seu primeiro trabalho, com medições de tensões residuais em tiras de aços X70 e em tubos do mesmo material. Além desses resultados são apresentados resultados de medidas de tensões residuais em tubos de aço X65 em condições de com e sem revestimento, o revestimento nesse caso é feito por um processo térmico onde o tubo é coberto por um material que irá proporcionar uma proteção contra ações ambientais no campo.

Os autores relacionam os maiores valores de tensões residuais na direção axial devido as ações de laminação, pois os tubos possuem pouca espessura de parede, com uma relação D/t elevada, onde D é o diâmetro do tubo e t é a espessura da parede. Nesse caso o efeito das tensões de dobramento é reduzido.

Ao avaliarem o efeito do recobrimento dos tubos de aço X65, Law *et al* [30] constataram uma redução significativa dos valores das tensões residuais nestes tubos, as tensões residuais na direção longitudinal caíram de 323 para 61MPa. As tensões residuais circunferenciais também apresentaram uma mudança significativa em seus valores na caindo de 242 para 9MPa. A redução pode ter sido causada devido ao escoamento trativo da superfície externa durante a operação de resfriamento do recobrimento do tubo, que é feita com um spray de água no lado de fora do tubo.

Além da análise das tensões residuais após a etapa de recobrimento, uma comparação foi feita entre a técnica da difração de nêutrons com uma técnica de corte longitudinal similar à utilizada por Amirat *et al* [24], porém esta se limitava apenas a medições linearizadas das tensões residuais circunferenciais. O cálculo das tensões residuais máximas a partir do corte dos tubos é baseado numa distribuição de tensões assumida como linear e elástica.

Os tubos sem recobrimento de aços X70 e X65 sofreram aberturas de 15 a 24mm após os cortes, enquanto que os tubos de aço X65 recobertos com apresentaram uma abertura mais reduzida, de 1,3mm.

Este é outro indicativo de que a etapa de recobrimento exerce certo tipo de alívio das tensões residuais. Pois como mostrado nas outras literaturas do presente tópico [24,26], o efeito de abertura ou fechamento dos tubos, após os cortes longitudinais dos mesmos, está relacionado com o alívio das tensões residuais presentes no material, trativas ou compressivas, respectivamente.

Não se pode esperar que resultados de medidas realizadas após o corte dos tubos, ou seja, a partir do alívio das tensões residuais, sejam idênticas às obtidas por técnicas que meçam tensões residuais de forma não-destrutiva, como por exemplo, as técnicas de difração de raios-X, a difração de nêutrons e a técnica ultra-sônica, foco do presente estudo.

Isto se deve ao fato de que as técnicas baseadas em alívio das tensões residuais distribuem de forma homogênea a contribuição do dobramento por toda a espessura e ao longo de todo o arco do tubo.

Os resultados obtidos por Law *et al* [30] apontam para uma questão interessante, o efeito da etapa de recobrimento dos tubos. Por esta geralmente ser realizada com temperaturas mais elevadas, é possível se realizar um certo alívio térmico das tensões residuais, o que é muito importante do ponto de vista da segurança e vida dos tubos, podendo assim reduzir o surgimento de possíveis defeitos ou falhas prematuras, como as que ocorrem em componentes com elevados níveis de tensões residuais quando colocados em serviço.

Em trabalho preliminar utilizando a técnica ultra-sônica para medição de tensões residuais em um tubo de aço API 5L X65, Bittencourt *et al* [31] avaliaram a acustoelasticidade deste tubo em função do processo de fabricação e durante o carregamento de corpos de prova obtidos do mesmo.

Foram feitas medidas de birrefringência acústica em tiras demarcadas ao longo do perímetro do tubo, sendo que nas tiras foram marcados cinco pontos e nestes foram feitas medidas de tempo de percurso de ondas ultra-sônicas cisalhantes em duas direções de polarização ortogonais. A birrefringência acústica permite caracterizar o estado de tensões em termos da diferença das tensões principais [31].

Nas medidas de birrefringência realizadas no tubo com o intuito de se avaliar o processo de fabricação do tubo, foi constatado que para tubos com costura obtidos pelo processo ERW, o material apresentou uma nítida variação da anisotropia acústica em função da sua localização no tubo, o que mostra que o processo de fabricação causa no material uma certa heterogeneidade. Isto é um forte indicativo de que cada

tira se comporta como um material com características mecânicas distintas entre si. Essa observação mostra como medidas de tensões residuais baseadas em ajustes lineares ou que considerem um perfil homogêneo de tensões residuais distribuídas ao longo do tubo podem não ser as mais apropriadas em certas situações.

Para avaliarem o comportamento acustoelástico do tubo durante o carregamento trativo, os autores cortaram as tiras marcadas nos tubos de modo que estas foram usadas como corpos-de-prova para ensaios de tração até o escoamento do material, durante o carregamento foram realizadas medidas de tempo no ponto central das tiras para se calcular o valor da birrefringência acústica.

Antes do ensaio de tração os mesmos pontos foram medidos nas tiras e através da birrefringência acústica foi possível perceber o alívio das tensões residuais, pois ocorreram mudanças nos valores do parâmetro após o corte das tiras.

Com os resultados obtidos pelo carregamento trativo de duas tiras, os autores obtiveram a constante acustoelástica de cada uma delas, que corresponde ao coeficiente angular das retas obtidas em gráficos de Birrefringência *versus* Tensão.

Os autores calcularam um relaxamento de 158MPa em um dos corpos-deprova e de 67MPa no outro.

Num segundo trabalho, Bittencourt [32] aplica a mesma metodologia do trabalho anterior para 21 (vinte e um) tubos de diferentes dimensões, especificações e processos de fabricação.

Ao aplicarem uma análise estatística dos resultados, foi possível dizer que para todos os tubos examinados os valores da birrefringência em uma mesma região do tubo poderiam ser considerados estatisticamente iguais. Resultado idêntico foi obtido nas tiras.

Foi verificado estatisticamente que, tanto a especificação do material, como a espessura, são fatores determinantes na birrefringência do tubo como recebido. Assim existe uma faixa de valores de B em que um material de mesma especificação se enquadra, mas desde que dentro de uma determinada espessura.

Também, para todos os tubos, foi verificado que a birrefringência entre as diferentes regiões dos tubos são estatisticamente diferentes umas das outras e que essa variação não ocorreu de maneira homogênea nos 21 tubos examinados. Não sendo possível definir um comportamento padrão em função do processo de conformação do tubo. Isto pode ser associado ao fato de não se possuir o histórico dos tubos estudados.

O efeito da deformação plástica durante a fabricação e operação dos tubos sobre B e a falta da homogeneidade do parâmetro ao longo da direção circunferencial do tubo, associado à necessidade da técnica ultra-sônica em se conhecer uma

referência inicial do material criam um obstáculo que deve ser superado, para a determinação de tensão em dutos pela técnica da birrefringência acústica.

Ao tentarem medir o nível de tensões residuais na parede de um tubo com diâmetro de 560mm, espessura de parede de 7,9mm e comprimento de 4,9m para transporte de óleo e gás que foi submetido a um ensaio de flexão em três pontos com uma carga de 22N, Alers & McColskey [22] também utilizaram a técnica ultra-sônica, porém, com transdutores eletromagnéticos (EMAT's). Esses autores utilizaram uma metodologia semelhante a adotada por Bittencourt *et al* [31,32]e encontraram o mesmo tipo de variação do valor da Birrefringência acústica ao longo da seção do tubo, e consideraram inaceitável o nível de incerteza que estaria inserido nos resultados de tensão.

Uma solução parcial foi estabelecer um valor de B_0 numa rede de pontos no tubo antes do dobramento por flexão, justamente na região que estaria exposta ao maior nível de tensão trativa causada pelo dobramento. Após o carregamento, as medidas realizadas na rede de pontos mostraram que os valores de B sofreram alterações, esses novos valores do parâmetro são resultado de uma soma da influência da deformação plástica causada pelo dobramento e da contribuição relacionada ao nível de tensões residuais inserido com o carregamento.

Em seus dois trabalhos, Bittencourt *et al* [31,32] também observaram este fato em tubos com costura, porém, em uma etapa anterior ao carregamento do material, ou seja, assumem que ao medirem os valores de B_0 nos pontos das regiões nos tubos, estes valores já são constituídos de um somatório da textura da chapa que deu origem ao tubo, da deformação plástica causada durante o processo de fabricação e das tensões residuais inseridas pelos dobramentos das etapas de fabricação. Enquanto não for possível separar esses efeitos do valor das medidas do parâmetro B, não será possível obter valores seguros de tensões residuais em tubos com costura, utilizando a técnica ultra-sônica.

Em trabalho mais recente utilizando a técnica ultra-sônica para medições de tensões residuais, Cardoso *et al* [33] realizaram um estudo acustoelástico em um tubo sem costura de aço API 5L X46, com 254mm de diâmetro (10pol) e 10mm de espessura de parede, obtidos pelo processo de laminação automática. A mesma metodologia aplicada por Bittencourt *et al* [31,32] em seus dois trabalhos foi utilizada para analisar os efeitos do processo de fabricação deste tipo de tubo. Por se tratar de um estudo preliminar, somente no ponto central de cada tira foram realizadas medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica para o cálculo da birrefringência acústica. Os resultados obtidos no tubo sem costura foram comparados com os de um tubo com

costura obtido pelo processo ERW, de material com a mesma especificação, com diâmetro de 457,2mm (18pol) e 11,7mm de espessura de parede.

Os resultados do tubo sem costura indicaram um comportamento de birrefringência acústica bem diferente do obtido com o tubo com costura, sendo esta mais homogênea ao longo do tubo e com valores mais próximos de zero. As diferenças de tempo de percurso da onda ultra-sônica no tubo sem costura foram menores em uma ordem de grandeza das obtidas no tubo com costura.

Esta diferença de tempo muito pequena indica uma possível isotropia acústica dos tubos sem costura, pois, teoricamente, um material com isotropia acústica apresenta uma diferença nula entre tempos de percurso da onda ultra-sônica.

Este se torna fato fundamental para a aplicação da técnica ultra-sônica de medição de tensões residuais em tubos, pois nos trabalhos anteriores [22,31,32] com tubos obtidos por outros processos foi constatada a diferença do parâmetro ao longo das seções transversais dos tubos, de modo que não era simples estabelecer um parâmetro inicial que representasse a real condição do componente. Nos tubos sem costura existe a possibilidade de se eliminar esse termo inicial, facilitando assim a medição de tensões residuais de forma direta e não-destrutiva destes tubos.

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, um estudo mais aprofundado do comportamento acustoelástico de tubos sem costura foi proposto para o presente trabalho.

3.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Torna-se evidente a preocupação atual em se determinar o nível de tensões residuais em tubos de transporte de óleo e gás, pois com as informações obtidas na literatura, é possível perceber que os valores de tensões residuais encontrados podem causar uma grande influência na vida em serviço destes tubos. Este é um risco que tem que ser minimizado ao máximo ou acompanhado com o máximo cuidado pela indústria. Dentre as técnicas não destrutivas utilizadas atualmente, a técnica ultra-sônica baseada na acustoelasticidade mostra-se promissora para medição de tensões residuais em tubos, especialmente nos sem costura, obtidos pelo processo de laminação automática.

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E METODOLOGIA DE ESTUDO

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os tubos utilizados como material de estudo do presente trabalho. Também são descritos os testes realizados na validação do equipamento portátil para aquisição de sinais ultra-sônicos, os ensaios realizados na avaliação acustoelástica dos tubos e na caracterização microestrutural de amostras retiradas dos mesmos.

4.2 – MATERIAL DE ESTUDO

Na avaliação acustoelástica de tubos utilizados no transporte de óleo e gás, foram utilizados dois tubos com 50cm de tubos de aço API 5L X46 fabricados por diferentes processos. O primeiro, um tubo sem costura, obtido pelo processo Mannesmann de laminação automática, com espessura de parede de 10mm e diâmetro interno de 254mm (10pol). O segundo, um tubo fabricado pelo processo ERW com espessura de parede de 11,5mm e diâmetro interno de 457,2mm (18pol). Os tubos estudados foram fornecidos pela TRANSPETRO S/A, empresa subsidiária da Petrobrás, Petróleo Brasileiro S/A, na parte de transporte de óleo e gás. A Figura 4.1 apresenta o tubo sem costura e o tubo com costura, respectivamente.



Figura 4.1. Materiais de estudo: tubo sem costura e tubo com costura.

4.3 – EQUIPAMENTO PORTÁTIL PARA MEDIÇÃO DO TEMPO DE PERCURSO DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS

Para a realização dos ensaios nos tubos sem e com costura, foi utilizado pela primeira vez, um equipamento portátil desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) para gerar e medir o tempo de percurso da onda ultra-sônica. Nele é utilizada uma placa que gera o sinal ultra-sônico e recebe esse sinal digitalizado com uma amostragem de 100MHz. Essa placa é gerenciada por um programa trabalhando no ambiente Labview[®] que faz um processamento matemático do sinal ultra-sônico da mesma forma que o proposto por Bittencourt et al [14,17], fornecendo uma medida de tempo rápida e de alta precisão. O equipamento é composto por uma caixa metálica, na qual em seu interior se encontra um dispositivo para gerar o sinal ultra-sônico. Essa caixa, por sua vez é conectada a um notebook, contendo o programa que realizará o processamento do sinal ultra-sônico. Dessa maneira, o sistema resume-se a dois componentes de fácil mobilidade, ao contrário do sistema utilizado normalmente para a medida de tempo, que consiste de um gerador de sinal ultra-sônico, um osciloscópio e um computador comum. O equipamento portátil utilizado no presente trabalho e o sistema utilizado atualmente são apresentados nas Figuras 4.2(a) e 4.2(b), respectivamente.



Figura 4.2. Sistemas para aquisição, processamento e medição do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas: equipamento portátil (a); sistema atual (b).

Além de ser portátil, o novo equipamento fornece medidas mais precisas do que o outro. Pois a etapa de interpolação do sinal no equipamento utilizado atualmente, que consiste num refinamento do mesmo, tomava muito tempo, sendo

geralmente utilizada a interpolação denominada L4, onde são inseridos 3 (três) novos pontos entre dois pontos do sinal original. Já no equipamento portátil, o sinal sofre uma interpolação instantânea denominada L16, que consiste em inserir 15 (quinze) novos pontos entre dois pontos do sinal original. Uma tela do programa utilizado no equipamento portátil e as diferenças entre o sinal original e o sinal interpolado por L16 podem ser observadas nas Figuras 4.3(a) e 4.3(b), respectivamente.



Figura 4.3. Programa utilizado no equipamento portátil: tela do programa (a); detalhe dos sinais original e interpolado em L16 (b).

Outra vantagem do equipamento portátil em relação ao equipamento utilizado atualmente está no fato do equipamento fornecer um sinal que consiste numa média de sinais gerados, variando de 1a 1000 sinais, evitando assim possíveis oscilações durante a aquisição do sinal. Dessa maneira, a medida de tempo obtida através do processamento matemático por correlação cruzada será obtida de forma mais precisa e rápida do que a gerada pelo equipamento anterior.

A primeira etapa do presente trabalho foi avaliar se o novo equipamento era equivalente aos equipamentos utilizados para medição do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas.

Para isso, foram realizados dois ensaios. O primeiro, consistiu em comparar as medidas de tempo obtidas pelo equipamento convencional com o novo.

O corpo-de-prova utilizado para o ensaio foi uma tira retirada de um tubo de aço API 5L X70 com 500mm de comprimento, 45mm de largura e 17,1mm de espessura.

A aquisição dos sinais ultra-sônicos foi realizada com a utilização de um transdutor de ondas cisalhantes com uma freqüência de 2,25/0,5MHz (freqüência natural do cristal piezelétrico colado ao bloco amortecedor), modelo V154 do fabricante Panametrics. O acoplante utilizado para o ensaio foi do fabricante Panametrics, modelo SWC. A finalidade do acoplante é evitar a presença de camadas de ar entre o transdutor e o corpo-de-prova, já que o ar é convencionalmente um meio isolante para ondas cisalhantes. Utilizou-se ainda uma garra, cuja função era fornecer pressão constante ao transdutor, e com isso evitar maiores erros de acoplamento durante o ensaio.

A variação de temperatura durante o ensaio foi realizada com o auxílio de um termômetro do fabricante Testo, modelo 177, este equipamento permite que sejam tomadas medidas de temperatura ambiente e no corpo-de-prova.

Previamente ao ensaio, ambos os sistemas ultra-sônicos foram ligados aproximadamente 30 minutos antes do início das medições a fim de evitar possíveis imprecisões decorrentes de aspectos eletrônicos.

As medidas de tempo de percurso das ondas ultra-sônicas foram realizadas no ponto central da tira, em duas direções de polarização ortogonais. A primeira, adotada como longitudinal, ou seja, direção do comprimento do tubo, e a segunda, adotada como transversal, correspondente à direção circunferencial do tubo. Ambos os equipamentos foram configurados para operar no modo pulso-eco.

Cabe ressaltar que ao final da aquisição dos sinais com um equipamento, o cabo do transdutor era retirado de um dos sistemas e ligado ao outro, para se evitar diferenças devido ao acoplamento bem como possíveis mudanças de temperatura que pudessem prejudicar a comparação das medidas obtidas nos dois sistemas.

O primeiro conjunto de sinais aquisitados nos equipamentos utilizou o transdutor na direção de polarização longitudinal. Concluído este processo, imediatamente repetiu-se o procedimento utilizado, agora, porém, com o transdutor na direção de polarização transversal. Nos dois processos foram coletados 20 (vinte)

sinais em cada sistema, sendo que o sinal gerado no equipamento portátil correspondia a uma média de 100 (cem) sinais.

As imagens dos sinais ultra-sônicos, na polarização longitudinal, retiradas do equipamento portátil e do sistema utilizado atualmente são mostradas nas Figuras 4.4(a) e 4.4(b), respectivamente. Os resultados dos valores de birrefringência calculados a partir das medidas de tempo dos dois equipamentos são mostrados na Figura 4.5.



(a)



Figura 4.4. Sinais ultra-sônicos gerados na direção longitudinal: equipamento portátil (a); equipamento atual (b).



Figura 4.5. Resultados de birrefringência acústica calculada a partir das medidas de tempo obtidas pelo equipamento portátil e pelo equipamento atual.

É possível perceber um comportamento mais regular da birrefringência acústica calculada a partir das medidas de tempo de percurso obtidas com o equipamento portátil.

Como a idéia principal do ensaio era provar que o equipamento portátil era capaz de realizar medidas similares as do equipamento atual, uma análise estatística dos resultados obtidos foi realizada.

A análise estatística mais apropriada para o ensaio realizado, que consistiu em provar a igualdade estatística das medidas de birrefringência obtida a partir das medidas de tempo dos equipamentos, foi a baseada no resultado obtido de um teste de hipótese.

Muitas análises requerem que uma decisão, a de aceitar ou rejeitar uma afirmação a respeito de um parâmetro, seja tomada. A afirmação é chamada de hipótese, e o procedimento de aceitação ou rejeição desta hipótese é chamado teste de hipótese. Este é um dos mais úteis aspectos de inferência estatística, pois muitos dos tipos e de problemas de tomadas de decisão, experimentos ou testes de engenharia podem ser formulados através de problemas de teste de hipóteses [34].

Uma hipótese estatística é uma afirmação a respeito dos parâmetros de uma ou mais populações.

Na realização deste tipo de teste estatístico, é necessária a definição de duas hipóteses, a hipótese nula, geralmente expressa como H₀, e a hipótese alternativa, expressa por H₁. A hipótese nula sempre é utilizada para referenciar igualdade do valor médio de um parâmetro a um valor, ou para referenciar a igualdade entre médias de duas populações, enquanto a hipótese alternativa é utilizada para indicar a diferença do valor estipulado na hipótese nula, podendo essa hipótese ser baseada simplesmente numa diferença do valor adotado, sendo o teste realizado, nesse caso, chamado de bi-caudal, pois o valor pode ser maior ou menor do que o admitido pela hipótese nula. Pode-se também estipular um valor para a hipótese alternativa, sendo este maior ou menor do que o estipulado na hipótese nula, nesse caso, tem-se um teste chamado de uni-caudal.

Os procedimentos para testes de hipóteses dependem do uso da informação de uma variável aleatória da população de interesse. Se a informação é consistente com a hipótese, é possível concluir que a hipótese é verdadeira; por outro lado, se a informação é inconsistente com a hipótese, conclui-se que a hipótese é falsa. É necessário enfatizar que a veracidade ou falsidade de uma de uma hipótese particular nunca pode ser conhecida com certeza absoluta, a não ser que seja possível examinar a população inteira. O que é usualmente impossível nas situações práticas. Portanto, o

teste de hipótese deve ser desenvolvido com a probabilidade de se alcançar uma conclusão errônea.

A hipótese nula é a hipótese a ser testada. A rejeição da hipótese nula sempre leva a aceitação da hipótese alternativa. O teste de hipóteses envolve uma ou mais variáveis aleatórias, o cálculo do teste estatístico dos dados da amostra, e então usar o teste estatístico para tomar a decisão a respeito da hipótese nula.

O teste de hipótese pode levar a dois tipos de erros. O primeiro conhecido como erro do tipo I acontece quando a hipótese nula é rejeitada quando na verdade ela é verdadeira. Este tipo de erro também é conhecido como erro α ou nível de significância. O segundo tipo de erro ocorre quando se assume que não é possível rejeitar a hipótese nula, e na verdade, ela é falsa. Este erro é conhecido como erro do tipo II, denotado por β .

Geralmente controla-se a probabilidade α do erro tipo I quando se selecionam os valores críticos dos testes. Assim, é geralmente mais fácil ajustar a probabilidade de erro do tipo I para qualquer valor desejado. Como se pode controlar diretamente a probabilidade de se rejeitar erroneamente a hipótese nula, assume-se que a rejeição da hipótese nula é uma conclusão mais forte. Ou seja, o objetivo principal do teste de hipóteses é sempre tentar rejeitar a hipótese nula.

Com base das informações da literatura [34], os seguintes passos são recomendados na aplicação de testes de hipóteses:

- 1. Identificar o parâmetro de interesse dentro do contexto do problema;
- 2. Estabelecer a hipótese nula, H₀;
- 3. Especificar uma hipótese alternativa, H₁;
- 4. Escolher o nível de significância, α ;
- 5. Determinar o teste estatístico apropriado;
- 6. Estabelecer a região de rejeição para o teste;
- 7. Calcular as quantidades necessárias das amostras e substituí-las na equação do teste estatístico, e então calcular o valor do teste;
- 8. Decidir se H₀ deve ou não ser rejeitada.

No caso da análise das medidas de birrefringência dos dois equipamentos utilizados. Realizou-se um teste de hipótese para se avaliar a diferença das médias das duas amostras. A hipótese nula nesse caso foi assim estabelecida H₀: $\mu_1 - \mu_2 = \Delta_0$. Obviamente, na maioria dos casos, especifica-se $\Delta_0=0$, de forma que se realiza o teste da igualdade das duas médias das amostras.

No caso onde as variâncias das amostras são conhecidas, a estrutura do teste de hipóteses pra avaliar a igualdade de duas médias é:

- > Hipótese Nula, H₀: $\mu_1 \mu_2 = \Delta_0$;
- Teste Estatístico utilizando a equação 4.1:

$$Z_{0} = \frac{\overline{X}_{1} - \overline{X}_{2} - \Delta_{0}}{\sqrt{\frac{\sigma_{1}^{2}}{n_{1}} + \frac{\sigma_{2}^{2}}{n_{2}}}}$$
(4.1)

Onde \overline{X}_1 e \overline{X}_2 são as médias das amostras, Δ_0 é a diferença entre as médias, σ_1^2 e σ_2^2 são as variâncias das amostras, n_1 e n_2 correspondem ao número de medidas realizadas em cada uma da amostras;

Hipóteses Alternativas

$$H_{1}: \mu_{1} - \mu_{2} \neq \Delta_{0}$$
$$H_{1}: \mu_{1} - \mu_{2} > \Delta_{0}$$
$$H_{1}: \mu_{1} - \mu_{2} < \Delta_{0}$$

A hipótese nula é rejeitada quando o valor calculado pelo teste estatístico é maior do que o valor crítico do teste para o nível de significância estabelecido, obtido em tabelas.

No caso da análise dos equipamentos, a hipótese nula é estimar que as médias das medidas de birrefringência acústica dos dois equipamentos são iguais. Assim, o equipamento portátil estaria validado para futuros ensaios. A hipótese alternativa mais apropriada seria supor apenas que as médias das amostras são diferentes, nesse caso, o teste realizado foi bi-caudal.

A ferramenta utilizada para a realização dos testes foi o software Microsoft Excel[®] que possui uma ferramenta para análise de dados, com essa ferramenta é possível realizar diversas análises estatísticas, dentre estas, testes de hipóteses. O teste utilizado foi o denominado *Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes*.

Esta ferramenta de análise e suas fórmulas executam um teste-t de duas amostras. Esta forma de teste-t pressupõe que as variâncias dos dois intervalos de dados são diferentes; é chamada de teste-t heteroscedástico [35]. Os testes-t são usados para determinar se as médias de duas amostras são iguais. A fórmula usada para determinar o valor estatístico de teste t é a mesma da equação 4.1, apresentada acima.

A fórmula a seguir é usada para aproximar os graus de liberdade. Geralmente, o cálculo não resulta em um número inteiro, por isso é usado o número inteiro mais próximo para obter um valor crítico da tabela t.

$$df = \frac{\frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}{n_1}}{\frac{(\sigma_1^2/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(\sigma_2^2/n_2)^2}{n_2 - 1}}$$
4.2

Onde σ_1^2 e σ_2^2 são as variâncias das amostras, n₁ e n₂ correspondem ao número de medidas realizadas em cada uma da amostras

A Figura 4.6 apresenta a caixa de dialogo fornecida pelo software para realização de teste de hipóteses.

ntrada	5		OK
ntervalo da variável <u>1</u> ;	I	<u> </u>	<u>V</u>
ntervalo da variável <u>2</u> ;		<u> </u>	Cancelar
lipotése da diferenca de	média:		Ajuda
ipotoso da di ci cinga do	, model, j		
Rótulos			
lfa: 0,05			
pções de saída		1	
		<u>N</u>	
🗋 Intervalo de <u>s</u> aída:			
 Întervalo de <u>s</u>aída; No<u>v</u>a planilha; 			



As seguintes informações devem ser inseridas nos campos da caixa de dialogo:

Intervalo da variável 1: É preciso Inserir a referência da célula para o primeiro intervalo de dados que se deseja analisar. O intervalo deve consistir em uma única coluna ou linha de dados;

- Intervalo da variável 2: É preciso inserir referência da célula para o segundo intervalo de dados que se deseja analisar. O intervalo deve consistir em uma única coluna ou linha de dados;
- Hipótese da diferença de média: É preciso inserir o número que se deseja para a mudança nas médias das amostras. O valor 0 (zero) indica que as médias das amostras são hipoteticamente iguais;
- > Rótulos: O software gera rótulos de dados adequados para a tabela de saída;
- Alfa: Esse campo é destinado ao valor do nível de confiança do teste. O valor deve ficar entre 0 e 1. O nível de confiança está relacionado à probabilidade de ocorrência de um erro tipo I. O alfa escolhido foi de 0,05;
- Intervalo de saída, Nova planilha e Nova pasta de trabalho: São as três opções onde o programa vai gerar a tabela com os resultados obtidos no teste.

A Tabela 4.1 apresenta o resultado do teste de hipótese de igualdade das medidas de birrefringência acústica obtidas a partir das medidas de tempo dos equipamentos portátil e atual.

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes – Medidas de birrefringência dos equipamentos.				
	Equipamento portátil	Equipamento atual		
Média	-0,006199032	-0,00622415		
Variância	9,70282E-14	4,85082E-08		
Observações	20	20		
Hipótese da diferença de média	0			
gl	19			
Stat t	0,510026559			
P(T<=t) uni-caudal	0,307953302			
t crítico uni-caudal	1,729131327			
P(T<=t) bi-caudal	0,615906603			
t crítico bi-caudal	2,093024705			

Tabela 4.1. Teste de Hipótese para as médias das medidas de birrefringência acústica realizadas com os equipamentos portátil e atual.

Pode-se notar no teste que o valor calculado do teste estatístico (Stat t) é menor que os valores críticos, tanto para teste uni-caudal quanto para o bi-caudal, sendo este o escolhido para a análise realizada com as medidas de tempo dos equipamentos. Sendo assim, não foi possível rejeitar a hipótese das medidas serem estatisticamente diferentes. Pode-se aceitar com 95% de certeza que as medidas de tempo realizadas pelo equipamento portátil e pelo equipamento atual são estatisticamente iguais.

Com a confirmação de que o equipamento portátil era capaz de realizar medidas de tempo equivalentes às do equipamento utilizado atualmente, o passo seguinte foi realizar um ensaio para avaliar a sensibilidade do equipamento à presença de tensões no material.

Foram realizados dois ensaios para levantar as constantes acustoelásticas de dois corpos-de-prova. Os ensaios consistiram em realizar pares de medidas de tempo de percurso de ondas ultra-sônicas cisalhantes durante um ensaio de tração uniaxial. As medidas em pares foram feitas em direções ortogonais uma a outra, dessa maneira, é possível calcular a birrefringência acústica de acordo com a Equação 3.8, apresentada no capítulo anterior:

$$B = \frac{V_{1} - V_{t}}{\frac{V_{1} + V_{t}}{2}} = \frac{-(t_{1} - t_{t})}{\frac{t_{1} + t_{t}}{2}}$$
3.8

Ao final dos ensaios são gerados gráficos do tipo Birrefringência versus Tensão, que no caso de aços, apresentam um comportamento linear, regido pela Equação 3.9, também apresentada no capítulo anterior:

$$\mathsf{B} = \mathsf{B}_0 + \mathsf{m}(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{3.9}$$

O comportamento linear da birrefringência em função da tensão é apresentado no gráfico ilustrativo da Figura 4.7

Com a realização do ensaio, é possível se obter a constante acustoelástica do material, pois essa corresponde ao coeficiente angular da reta obtida. Como os outros elementos da Equação 3.9, que são B, B₀ e a tensão aplicada, são facilmente obtidos durante o ensaio, pode-se calcular o coeficiente angular da reta gerada sem maiores problemas.



Figura 4.7. Gráfico ilustrativo do comportamento dos aços quando submetidos a ensaios de tração uniaxial para levantamento da constante acustoelástica.

Foram realizados ensaios de tração em duas tiras de aço com classificação API 5L X-70 de um tubo fabricado pelo processo UOE-SAW.

As cargas fornecidas aos corpos de prova ficaram estipuladas após cálculo dos seus limites de escoamento. A cada carregamento imposto ao material, havia uma interrupção no ensaio para que os pares de medida de tempo fossem aquisitados para a carga estabelecida. Realizadas as medições, o ensaio continuava para a próxima carga estabelecida e era interrompido novamente para uma nova série de aquisições de sinais, esse procedimento foi realizado até que o escoamento do material fosse atingido. As dimensões do primeiro corpo-de-prova (CP1) ensaiado eram 12,54x 45 x 500mm, e do segundo corpo-de-prova (CP2) eram 12,50X 45 x 500mm. Cada ensaio teve uma duração aproximada de uma hora e a temperatura ambiente foi de 22°C.

Em ambos os ensaios foram utilizados, simultaneamente, o equipamento portátil e o equipamento atual. Os sinais foram aquisitados em pontos distintos dos corpos-de-prova, porém, próximos. Um transdutor de 5MHz de freqüência, do fabricante Panametrics, modelo V155 foi utilizado no equipamento portátil, enquanto um transdutor de 2,25MHz de freqüência, também do fabricante Panametrics, modelo V154, foi utilizado no equipamento utilizado atualmente. Utilizou-se um acoplante do fabricante Panametrics, modelo SWC, nos dois pontos medidos.

Os pontos dos corpos-de-prova onde os sinais foram aquisitados foram devidamente lixados, de forma a deixar as superfícies mais limpas e planas possível.

Antes de qualquer carregamento, foram efetuados dois pares de medidas de tempo de percurso de ondas ultra-sônicas no ponto determinado no corpo-de-prova 1 (CP1) e um par de medidas no corpo-de-prova 2 (CP2). O par de medidas foi realizado

medindo-se o tempo de percurso da onda ultra-sônica na direção adotada como longitudinal, coincidente com as direções de laminação do material e de carregamento durante o ensaio, ao se realizar a medida, o transdutor era girado em 90°, daí então era realizada outra medida de tempo de percurso, na direção adotada como transversal. As medidas foram feitas em pares para que se pudesse calcular os valores de birrefringência acústica durante cada etapa do ensaio.

Durante o ensaio, foi efetuado somente um par de medidas por carga aplicada e estabilizada no corpo-de-prova.

Os resultados dos ensaios realizados pelos dois equipamentos nos dois corpos-de-prova podem ser observados na Figura 4.8. Na figura também estão apresentadas as equações das retas que representam o comportamento da birrefringência acústica em função da tensão.



Figura 4.8. Resultados dos ensaios de levantamento das constantes acustoelásticas de duas tiras de tubo API 5L X70 utilizando o equipamento portátil e o equipamento atual.

Como os valores dos coeficientes angulares das quatro retas geradas, duas para cada corpo-de-prova, são praticamente os mesmos. Conclui-se que o novo equipamento portátil apresenta sensibilidade ao estado de tensões no material da mesma forma que o sistema atual, podendo assim ser utilizado para aplicações em campo com segurança em suas medidas e com precisão maior do que as obtidas com o sistema atual.

Cabe ressaltar que as diferenças nos valores dos coeficientes lineares das retas obtidas nos ensaios são função das freqüências dos transdutores utilizados.

4.4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental buscou comparar o comportamento acustoelástico de um tubo sem costura com o de um tubo com costura. Para isso foi definido um programa envolvendo os seguintes ensaios: medição da birrefringência acústica nos tubos, levantamento das constantes acustoelásticas dos tubos e caracterização microestrutural dos tubos.

4.4.1 – Medição da Birrefringência Acústica dos Tubos

Foi realizada uma avaliação acustoelástica em dois tramos com 50cm de tubos de aço API 5L X-46 fabricados por diferentes processos. O primeiro, um tubo sem costura, obtido pelo processo de laminação automática, com espessura de parede de 10mm e diâmetro interno de 254mm (10pol). O segundo, um tubo fabricado pelo processo ERW com espessura de parede de 11,7mm e diâmetro interno de 457,2mm (18pol). Foram realizados ensaios acompanhando o comportamento da birrefringência acústica em diferentes regiões dos mesmos, para posterior comparação dos resultados obtidos em cada um dos tubos.

Na realização das medidas de tempo de percurso de ondas cisalhantes nos tubos, foi utilizado o equipamento portátil avaliado nos dois ensaios descritos anteriormente no presente trabalho. O equipamento trabalhou na configuração pulso-eco.

Os ensaios nos tubos consistiram na medição do tempo de percurso de vinte sinais ultra-sônicos em três pontos de regiões definidas dos tubos, dos quais dez foram aquisitados na direção adotada como longitudinal, direção do comprimento do tubo, e os outros dez numa direção perpendicular a esta, adotada como transversal, direção circunferencial do tubo, de modo a se obter dez valores de birrefringência acústica em cada ponto. As medidas de tempo em cada um dos pontos dos tubos foram feitas numa direção, para que posteriormente o transdutor fosse girado, e daí então fossem efetuadas as medidas na posição perpendicular a anterior. Dessa maneira, o erro inserido nas medidas devido à rotação do transdutor seria reduzido. Isto só foi possível devido a utilização do equipamento portátil, que como mostrado anteriormente, possibilita medições de alta precisão e em tempo real.

A aquisição dos sinais ultra-sônicos foi realizada utilizando um transdutor com uma freqüência de 2,25MHz, fabricante Panametrics modelo V154. O acoplante utilizado para ondas cisalhantes foi do fabricante Panametrics, modelo SWC.

Durante todas as etapas de aquisição dos sinais ultra-sônicos foi realizado um acompanhamento da temperatura das regiões, em ambos os tubos, sendo medidas para melhor compreensão dos resultados obtidos. Foi utilizado um termômetro do fabricante Testo, modelo 177, este equipamento permite que sejam tomadas medidas de temperatura ambiente e no corpo-de-prova.

Os ecos dos sinais ultra-sônicos utilizados para obtenção do tempo de percurso da onda ultra-sônica através do processamento matemático da correlação cruzada foram o terceiro e o quarto ecos. Essa escolha foi feita com base na influência do campo próximo gerado no sinal ultra-sônico, por ser uma região de elevada interferência ondulatória devida a proximidade com o cristal piezelétrico responsável pela geração do sinal ultra-sônico. O tamanho do campo próximo pode ser calculado através da seguinte fórmula, apresentada na equação 4.3 [12]:

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4.\lambda}$$
 4.3

Onde D_{ef}^2 é o diâmetro efetivo do cristal, no caso de cristais circulares, D_{ef}^2 =0.97x diâmetro do cristal e λ é o comprimento de onda.

No caso do transdutor utilizado, o campo próximo calculado foi de 29,3mm. Considerando-se que a espessura das paredes dos tubos, 10 e 11,7mm, foram as distâncias percorridas pelas ondas, foi possível prever que o terceiro e quarto ecos já não estariam sofrendo uma influência do campo próximo.

Dois operadores foram necessários para aquisitar os sinais durante o ensaio, um para operar o equipamento, fazendo os ajustes do sinal e salvando as medidas de tempo, e outro, para assegurar que o transdutor se encontrasse na posição correta e bem acoplado durante a aquisição dos sinais. A Figura 4.9 apresenta a forma como os sinais foram aquisitados nos tubos e as Figuras 4.10(a) e 4.10(b) mostram em detalhe as posições do transdutor para aquisição dos sinais nas direções longitudinal e transversal, respectivamente.



Figura 4.9. Aquisição dos sinais ultra-sônicos.



(a)

(b)

Figura 4.10. Posições do transdutor durante aquisição dos sinais: direção longitudinal (a); e direção transversal (b).

O tubo com costura apresenta uma linha de referência, o cordão de solda, neste caso foi feita a marcação de cinco regiões nomeadas como 12+h, 3h, 6h, 9h e 12-h, sendo as regiões 12+h e 12-h opostas em relação ao cordão de solda. Devido ao fato do tubo sem costura não apresentar uma linha de referência como o cordão de solda, as regiões foram nomeadas como 12h, 3h, 6h e 9h, de modo a serem distribuídas simetricamente pelo tubo. As disposições das regiões analisadas em cada um dos tubos estão apresentadas na Figura 4.11.



Figura 4.11. Disposição das regiões para medição de tempo nos tubos: tubo com costura (a); e tubo sem costura (b).

As medidas de tempo de percurso das ondas ultra-sônicas atravessando a espessura dos tubos nos pontos definidos de suas regiões foram feitas em várias etapas, pois erros experimentais foram detectados durante a análise dos resultados obtidos. Esses erros podem ser resultado de falhas de operação do equipamento e do operador responsável pelo acoplamento do transdutor.

A insistência na etapa de aquisição de sinais ultra-sônicos nos tubos permitiu um ganho significativo de experiência para ambos os operadores do sistema de aquisição de dados. Com isto, foram obtidos sinais que atenderam às expectativas do comportamento dos tubos.

Como o objetivo principal do trabalho era mostrar que o tubo sem costura apresentava um comportamento acustoelástico bem diferente do que o apresentado pelo tubo com costura, foram realizadas análises estatísticas com testes de hipótese para provar que o tubo sem costura apresentou-se acusticamente isotrópico, ou seja, não havia diferença significativa nas medidas de tempo de percurso realizadas nas direções longitudinal e transversal dos pontos definidos para análise no tubo sem costura.

A mesma metodologia adotada para testar a equivalência das medidas do equipamento portátil com as do sistema atual foi utilizada para provar estatisticamente a isotropia acústica do tubo sem costura.

Para que uma análise qualitativa e comparativa do estado de tensões residuais presentes nos tubos pudesse ser realizada, ambos os tubos foram cortados. Pois, de acordo com a literatura [24,26], a resposta dos tubos ao final da etapa de corte pode ser associada ao estado de tensões residuais presentes. Sendo que a abertura do

tubo ao final do corte está relacionada a um perfil de tensões residuais trativas, enquanto o fechamento do tubo após o corte é associado a um estado de tensões residuais compressivas.

Os cortes para a avaliação do comportamento dos tubos foram realizados por oxi-corte. Ao final dos cortes foram medidas as aberturas de ambos os tubos. O tubo sem costura apresentou uma abertura direta, referente a perda de material durante o corte e a um pequeno alívio de tensões, sem a necessidade de uma martelada para separação do material. No caso do tubo com costura, que não sofreu uma abertura direta no final do corte, foi possível medir uma abertura referente somente a perda de material, após essa medição foi aplicada uma martelada ao tubo, que se abriu repentinamente, devido ao alívio das tensões residuais presentes no mesmo, junto com a abertura final ocorreu um barulho também referente ao alívio de tensões do material.

Após os cortes iniciais os tubos foram cortados manualmente em serra de fita para que as regiões definidas anteriormente nos tubos pudessem ser medidas novamente, agora na forma de tiras. As medidas foram realizadas nos mesmos pontos medidos das regiões, quando estas ainda faziam parte do tubo. Dessa forma também foi possível avaliar o estado das tensões residuais nos tubos, através do comportamento da birrefringência antes e após os cortes dos materiais.

4.4.2 – Ensaio de Carregamento Uniaxial nas Tiras dos Tubos

A segunda etapa do plano experimental do presente trabalho foi avaliar a resposta acustoelástica dos materiais dos tubos quando sujeitos a carregamento externo. Para isso, as tiras removidas dos tubos foram submetidas a um carregamento uniaxial trativo até o limite elástico do material em questão.

A mesma metodologia utilizada no segundo teste realizado para validar o equipamento portátil foi seguida durante os ensaios nas tiras dos tubos com e sem costura. A cada carregamento imposto ao material, havia uma interrupção no ensaio para que 3 (três) pares de medida de tempo fossem aquisitados para a carga estabelecida. Realizadas as medições, o ensaio continuava para a próxima carga estabelecida e era interrompido novamente para uma nova série de aquisições de sinais, esse procedimento foi realizado até que o escoamento do material fosse atingido. Em cada tira ensaiada, o transdutor ultra-sônico foi acoplado no ponto central, com a sua direção de polarização alinhada à direção de carregamento, sendo então adquirido o sinal. A seguir, o transdutor foi girado de forma que sua direção de

polarização estivesse ortogonal à direção de aplicação da carga e adquirido este outro sinal, no mesmo ponto. As Figuras 4.12(a) e 4.12(b) ilustram a aquisição do sinal ultrasônico e um detalhe do acoplamento do transdutor no ponto central da tira, respectivamente.





Figura 4.12. Ensaio de carregamento nas tiras: aquisição do sinal ultra-sônico em uma tira sob carregamento uniaxial de tração (a); detalhe do transdutor acoplado à tira no ponto central do corpo-de-prova sendo submetido a carregamento(b).

4.4.3 – Caracterização Microestrutural dos Tubos

A caracterização microestrutural de um material consiste no exame microscópico, e no emprego de outras técnicas que possibilitem a identificação das fases estruturais e defeitos presentes no material. A análise do resultado obtido possibilita explicar a influência da microestrutura no comportamento de parâmetros e propriedades dos materiais.

A maioria dos constituintes estruturais dos materiais possui dimensões microscópicas, com dimensões na ordem de micrômetros. Por esta razão, estes constituintes devem ser investigados utilizando-se algum tipo de microscópio.

No presente trabalho foram realizadas análises da microestrutura de dois tubos de aço API 5L X46, obtidos por diferentes processos de fabricação, utilizando-se técnicas de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. Tanto os microscópios óticos como os microscópios eletrônicos são usados com freqüência no auxilio de investigações das características microestruturais; a maioria dessas técnicas emprega equipamentos fotográficos em conjunto com os microscópios.

Com a microscopia ótica realizou-se o exame com aumento de até 500 vezes, o que possibilitou o estudo da orientação dos grãos nas microestruturas dos dois tubos. Com as micrografias obtidas por essa técnica foi feita a medição do tamanho médio de grão das amostras, mediu-se também a fração volumétrica das fases presentes.

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para uma investigação mais detalhada dos constituintes microestruturais presentes nos aços, devido a capacidade de gerar grandes ampliações com boa resolução.

O MEV pode ser equipado com detetores de raios-x dos sistemas de espectrometria por dispersão de energia (EDS). Uma análise semiquantitativa por EDS foi realizada com o intuito de determinar se os aços utilizados no presente trabalho apresentavam composições químicas semelhantes.

4.4.3.1 – Preparação Metalográfica

As amostras que foram analisadas por microscopia ótica e eletrônica de varredura, e microanálise sofreram uma preparação metalográfica, envolvendo as seguintes etapas:

i. Seleção e Corte:

As amostras foram retiradas de tiras provenientes dos cortes dos tubos, através de corte realizado com o equipamento Delta Abrasimet, do fabricante Buehler. O corte das amostras foi executado de modo a deixar o menor grau de danificação estrutural por aquecimento e deformação mecânica nas amostras. As amostras foram obtidas nas direções longitudinal e transversal dos tubos, coincidentes com as direções utilizadas para as medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica nas tiras dos tubos. A Figura 4.13 apresenta o arranjo das amostras utilizadas na preparação metalográfica.

ii. Montagem:

A montagem tem como principal objetivo facilitar as operações de lixamento e polimento de amostras pequenas, e proteger suas bordas. A montagem foi realizada pelo processo de embutimento a frio, com uma resina acrílica, do fabricante Buehler, modelo Epothin.


Figura 4.13. Arranjo das amostras utilizadas na preparação metalográfica: tubo sem costura (a); tubo com costura (b).

iii. Lixamento:

O lixamento tem como principal objetivo reduzir a espessura da camada com estrutura danificada pelo corte. O lixamento das amostras foi realizado em lixadeiras semi-automáticas do fabricante Buehler, modelo Metaserv 2000, possuindo um prato giratório, com velocidade de rotação de 300-600 rpm, e um sistema de umedecimento das lixas por água corrente. O lixamento foi feito com lixas nas granulometrias de 120 mesh, 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh, 600 mesh e 1200 mesh, sendo iniciado com a lixa de maior granulometria na direção normal aos riscos provenientes do corte. A medida que se detectava a eliminação dos riscos na direção anterior através de visualização no microscópio ótico Olympus, modelo BX41, trocava-se de lixa até se chegar a lixa de menor granulometria. Mesmo após a aplicação da lixa de menor granulometria, a amostra ainda continua com uma pequena camada de sua estrutura danificada devido ao efeito abrasivo das lixas, sendo a camada afetada 5 vezes maior do que a granulometria da última lixa, quando o lixamento é úmido.

iv. Polimento:

O polimento tem como função principal reduzir ao mínimo a camada da amostra estruturalmente danificada pelo lixamento. Foi feito o polimento manual utilizando-se panos carregados com pasta de diamante, que consiste de microabrasivos, pequenas partículas de diamante, dispersos num veículo lubrificante. Antes de se iniciar o polimento, a amostra deve ser limpa em aparelho ultra-sônico, de modo a remover fragmentos abrasivos oriundos do lixamento, evitando-se desta forma que a amostra seja arranhada na etapa de polimento. Duas pastas de diferentes granulometrias foram usadas. A primeira pasta, com granulometria de 9μ m foi utilizada

em um pano Trident, do fabricante Buehler, para um polimento mais grosseiro, com a finalidade de retirar os riscos provenientes do último lixamento. Constatado o desaparecimento dos riscos do lixamento, procedeu-se ao uso de um pano com pasta de 1µm em um pano G, do fabricante Buehler. Ao final do último polimento executou-se a limpeza das amostras em aparelho ultra-sônico.

v. Ataque da Amostra:

O ataque tem por objetivo principal revelar a microestrutura das amostras. Foi usada a técnica de ataque químico, tendo sido utilizados três reagentes, Nital, Vilella e Beraha, de modo, a saber, qual destes iria revelar de maneira mais efetiva a microestrutura. Os ataques mais satisfatórios foram os realizados com Nital e com Beraha, pois ambos revelaram a distribuição dos grãos do material.

4.4.3.2 – Microscopia Ótica

Após a preparação metalográfica das amostras, estas foram examinadas e analisadas qualitativa e quantitativamente por microscopia ótica, utilizando os seguintes microscópios metalográficos:

Microscópio ZEISS AX10: microscópio metalográfico, que possibilita a obtenção de aumentos de 25 a 1000x, estando equipado com conjunto de padrões metalográficos e um sistema fotográfico. Permite observações por campo claro, campo escuro e luz polarizada, possibilitando as análises qualitativa e quantitativa das amostras.

A análise qualitativa é compreendida como um estudo de caráter descritivo dos constituintes microestruturais presentes nas amostras, podendo ser feita por observação direta das amostras nos microscópios, utilizando os métodos mais adequados para o exame da microestrutura do material, acompanhada da documentação por micrografias, fotografias da microestrutura, utilizando os sistemas fotográficos dos microscópios. As micrografias obtidas no presente trabalho foram feitas no microscópio ótico ZEISS modelo AX10, utilizando o método de observação de campo claro.

No presente trabalho a análise quantitativa foi feita utilizando as micrografias obtidas pelo sistema de aquisição digital de imagens do microscópio ZEISS, modelo AX10. Com as micrografias obtidas de forma digital, a análise foi realizada com o auxílio do software ANALYSIS[®] para tratamento de imagens. O software foi utilizado para a medição do tamanho dos grãos de ferrita dos aços, baseado na norma ASTM E

1382 [36], e também para a medição da fração volumétrica de ferrita e perlita presentes nas microestruturas, baseado na norma ASTM E 562 [37]. As análises do software são baseadas na norma AST

4.4.3.3 – Microscopia Eletrônica de Varredura

O Microscópio eletrônico de varredura é uma importante técnica utilizada na investigação microestrutural dos materiais, sendo usada principalmente para fornecer a imagem de elétrons secundários da topografia da superfície examinada, imagem de elétrons retro-espalhados indicativa da existência de diferenças locais de composição, imagens de raios-x correspondentes a variação de composição de cada elemento na área examinada, e análise química da composição local para cada elemento presente, a nível qualitativo, semiquantitativo ou quantitativo. O tipo de informação obtida depende da captação e processamento do respectivo sinal proveniente da amostra, resultante da interação da mesma com o feixe de elétrons incidente.

O Microscópio eletrônico de varredura permite uma análise mais detalhada dos constituintes microestruturais das amostras, pois proporciona maior resolução na imagem devido a sua capacidade de gerar imagens com aumentos superiores aos microscópios óticos; deste modo, pode se obter informações mais completas a respeito da microestrutura, as quais os microscópios óticos não foram capazes de fornecer.

Na preparação das amostras destinadas a análise por microscopia eletrônica de varredura é imprescindível que a mesma esteja bem limpa, para que não sejam induzidos erros nas análises e para que a qualidade das micrografias não seja afetada. As amostras foram fixadas em suportes para serem colocadas no porta amostras do microscópio; como as amostras estavam embutidas com material não condutor elétrico, foi feita uma ponte utilizando uma fita de carbono, ligando a amostra ao seu suporte, de modo a evitar acúmulo excessivo de carga na superfície da amostra, o que impossibilitaria qualquer tipo de observação. No atual trabalho, o método de observação no MEV foi pela captação dos elétrons secundários resultantes da interação da amostra com o feixe de elétrons, fornecendo imagens sobre a topografia da superfície da amostra, tendo sido utilizado um microscópio do fabricante ZEISS modelo LEO 940, localizado no laboratório de metalografia do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL.

4.4.3.4 – Análise Química Semiquantitativa por EDS

A análise do espectro de raios-x emitido por uma amostra pode determinar quais os elementos presentes em uma região localizada da amostra, possibilitando uma análise química qualitativa através da identificação do comprimento de onda (ou energia) de cada linha característica emitida, bem como determinar a quantidade de cada elemento presente (análise quantitativa ou semiquantitativa).

O MEV pode ser equipado com detetores de raios-x dos sistemas de espectrometria por dispersão de energia (EDS) e espectrometria por dispersão de comprimento de onda (WDS), para utilização na analise química. O ensaio foi realizado laboratório de metalografia do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL, utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura do fabricante ZEISS, modelo LEO 940, utilizando detetor com sistema EDS.

Os resultados obtidos por EDS são em geral menos precisos que os obtidos por WDS, mas quando são adotados determinados procedimentos, uma análise da composição de precisão satisfatória pode ser obtida. No atual trabalho, a análise obtida por EDS deve ser considerada como semiquantitativa, pela não utilização de padrões externos e pela dimensão do volume de interação.

O ensaio de EDS foi realizado com uma das amostras retiradas de cada um dos tubos, tendo como finalidade revelar a composição química dos tubos, de modo a verificar se os mesmos apresentavam composições químicas semelhantes.

4.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentados os tubos utilizados como material de estudo do presente trabalho. Os resultados dos testes realizados na validação do equipamento portátil para aquisição de sinais ultra-sônicos, que comprovaram a eficiência do equipamento para realizar medidas de tempo de percurso de ondas ultra-sônicas e também a sensibilidade do equipamento à presença de tensões no material. Por fim, foram descritos os ensaios realizados na avaliação acustoelástica dos tubos e na caracterização microestrutural de amostras retiradas dos mesmos.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes à avaliação acustoelástica dos tubos sem costura e com costura através dos valores de birrefringência acústica. Também são discutidos os resultados referentes aos ensaios de carregamento uniaxial das tiras obtidas dos tubos. Além destes, com o intuito de corroborar com os resultados da avaliação acustoelástica dos tubos, são apresentados os resultados da caracterização microestrutural de amostras retiradas dos mesmos.

5.2 – MEDIÇÃO DE BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA NOS TUBOS

Na avaliação acustoelástica dos tubos utilizados no transporte de óleo e gás, foram realizadas medidas de tempo de percurso de ondas ultra-sônicas cisalhantes percorrendo a espessura dos tubos. Os tubos foram divididos em regiões distribuídas ao longo de suas seções circunferenciais, para que um comportamento global da birrefringência acústica dos materiais pudesse ser avaliado. Foram definidos três pontos ao longo do comprimento das regiões dos tubos, nesses pontos foram realizadas dez medidas na direção adotada como longitudinal, ou seja, direção do comprimento do tubo, e outras dez numa perpendicular a essa, adotada como transversal. Dessa maneira, foi possível obter dez valores de birrefringência acústica em cada ponto de cada região dos tubos. Os resultados de birrefringência acústica em cada uma das regiões dos tubos e uma comparação do comportamento global da birrefringência acústica são apresentados a seguir, assim como as análises estatísticas referentes às medidas de tempo realizadas nos pontos.

5.2.1 – Tubo Com Costura

Como apresentado anteriormente, o tubo com costura apresenta uma linha de referência, o cordão de solda, neste caso as regiões foram nomeadas como 12+h, 3h, 6h, 9h e 12-h, sendo as regiões 12+h e 12-h opostas em relação ao cordão de solda. As medidas foram iniciadas na região 12+h e percorreram o tubo até a região 12-h. As

Figuras 5.1 a 5.5 apresentam o comportamento da birrefringência acústica nas regiões definidas do tubo com costura. As três curvas presentes em cada um dos gráficos são referentes ao comportamento da birrefringência acústica em cada um dos três pontos distribuídos ao longo das regiões.



Figura 5.1. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 12+h do tubo com costura.



Figura 5.2. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 3h do tubo com costura.



Figura 5.3. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 6h do tubo com costura.



Figura 5.4. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 9h do tubo com costura.



Figura 5.5. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 12-h do tubo com costura.

É possível notar em todos os gráficos que a birrefringência acústica apresenta um comportamento homogêneo em todos os pontos das regiões analisadas no tubo com costura. Porém, nota-se que os valores de birrefringência diferem de região para região, com valores negativos de birrefringência variando de 6,52x10⁻³ a 8,23x10⁻³ ao longo da seção circunferencial do tubo.

5.2.2 – Tubo Sem Costura

Como citado no capítulo anterior, o tubo sem costura não apresenta uma linha de referência como o cordão de solda, neste caso as regiões foram nomeadas como 12h, 3h, 6h, 9h de modo a serem distribuídas simetricamente pela seção circular do tubo. As medidas foram iniciadas na região 12h e percorreram o tubo até a região 9h. As Figuras 5.6 a 5.9 apresentam o comportamento da birrefringência acústica nas regiões definidas do tubo sem costura. As três curvas presentes em cada um dos gráficos são referentes ao comportamento da birrefringência acústica em cada um dos três pontos distribuídos ao longo das regiões.



Figura 5.6. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 12h do tubo sem costura.



Figura 5.7. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 3h do tubo sem costura.



Figura 5.8. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 6h do tubo sem costura.



Figura 5.9. Comportamento da birrefringência acústica ao longo da região 9h do tubo sem costura.

Assim como nas medidas das regiões do tubo com costura, também é possível notar em todos os gráficos das regiões do tubo sem costura, que a birrefringência acústica apresenta um comportamento homogêneo nos pontos das regiões analisadas nesse tubo. Em alguns pontos ocorrem certas variações nos valores das medidas, que podem ser associadas a algum tipo de erro experimental, ocorrido no momento da aquisição dos sinais, possivelmente devido a um mau acoplamento do transdutor no ponto analisado. Porém, nos gráficos apresentados acima é possível notar que os

valores de birrefringência acústica no tubo sem costura diferem significativamente dos valores de birrefringência acústica do tubo com costura, que apresentou uma variação de valores negativos de 6,52x10⁻³ a 8,23x10⁻³ ao longo da seção circunferencial do tubo. Já no tubo sem costura os valores variaram entre valores positivos e negativos de birrefringência, sendo estes, 3,23x10⁻⁴ a 5,37x10⁻⁴, respectivamente.

5.2.3 – Comparação dos Tubos

A Figura 5.10 apresenta o resultado do comportamento da birrefringência acústica na direção circunferencial dos tubos com e sem costura. Esse gráfico ilustra de forma clara a diferença do comportamento do parâmetro entre os dois tubos. Foram utilizados os valores médios de birrefringência em cada uma das regiões dos tubos.



Figura 5.10. Comportamento da birrefringência acústica ao longo das regiões dos tubos com e sem costura.

A figura anterior mostra claramente uma variação significativa da birrefringência acústica ao longo do tubo com costura, o que está de acordo com os resultados encontrados na literatura [21, 22, 25, 31,32].

Este tipo de variação pode indicar que as regiões do tubo se comportam como materiais com características mecânicas distintas entre si, ou seja, o material apresentaria uma anisotropia acústica que não pode ser definida através de um único valor. Com isso, a escolha do termo de birrefringência que represente o estado inicial do material, B_0 na Equação 3.9, para estes tubos se mostra como uma limitação a ser

superada para aplicação da técnica ultra-sônica de medição de tensões em tubos com costura.

Uma possível explicação para essa variação dos valores de birrefringência acústica ao longo da seção circunferencial do tubo com costura pode estar associada ao processo de fabricação do tubo. Pois o tubo é oriundo de uma chapa de aço laminada, que sabidamente já apresenta uma textura, devido à orientação preferencial dos grãos na direção de laminação da chapa. Sabe-se também que a textura cristalográfica apresenta uma influência nos valores das medidas de tempo de ondas ultra-sônicas cisalhantes na mesma ordem de grandeza que a causada pela presença de tensões residuais e/ou deformações plásticas [19]. No processo de fabricação do tubo com costura, a chapa passa por etapas de conformação onde regiões distintas do material sofrem maiores deformações plásticas do que outras e ao final das etapas de conformação mecânica, o tubo é soldado, contribuindo ainda mais para a mudança no perfil de tensões residuais no material. Dessa maneira, no produto final, ou seja, no tubo, tem-se, a textura cristalográfica da chapa inicial, um perfil heterogêneo de tensões residuais e a presença de regiões que sofreram maiores deformações plásticas do que outras devido ao processo de fabricação do tubo. Sendo assim, os valores de birrefringência medidos nos pontos do tubo com costura representam, na verdade, uma soma dessas três contribuições citadas anteriormente, sendo muito difícil separar a birrefringência referente somente à presença de tensões residuais no material.

Os valores do parâmetro medido no tubo sem costura diferem em uma ordem de grandeza menor do que os medidos no tubo com costura. Além disso, a variação entre valores positivos e negativos em alguns dos pontos medidos, indica um possível comportamento isotrópico do tubo sem costura. Essa oscilação entre valores positivos e negativos de birrefringência em um mesmo ponto medido mostra que em um dado momento, o tempo medido numa direção é maior que o medido na outra, e vice-versa, ou seja, as medidas estão dentro do intervalo de precisão do equipamento, que não consegue mais distinguir a diferença entre os tempos em duas direções ortogonais num mesmo ponto. Como é sabido na literatura, um material acusticamente isotrópico apresenta a diferença entre as medidas de tempo de percurso de ondas ultra-sônicas cisalhantes, em duas direções ortogonais igual a zero, nesse caso, a birrefringência acústica medidos no tubo sem costura estão muito próximos de zero, ainda mais se comparados aos valores de birrefringência acústica medidos no tubo sem costura estão muito próximos de zero, ainda mais se comparados aos valores de birrefringência acústica medidos no tubo com costura. A

ultra-sônica nas direções longitudinal e transversal em cada uma das regiões dos tubos.

Diferença entre os tempos nas direções Longitudinal e Transversal (ns)	Regiões dos Tubos						
	12+h	3h	6h	9h	12-h		
Tubo Sem Costura	1,4	0,6	1,9	3,2			
Tubo Com Costura	44,7	44,5	56,9	50,1	44,4		

Tabela 5.1 – Diferença entre os tempos de percurso da onda ultra-sônica nas regiões dos tubos estudados.

A possível razão do comportamento isotrópico do tubo sem costura pode também estar associada ao processo de fabricação do tubo, pois de acordo com a literatura [1], o processo Mannesmann produz tubos de qualidade mais elevada que os obtidos pelo processo ERW. Por ser um processo iniciado a altas temperaturas (aproximadamente 1200°C para tubos de aço), o que torna a laminação do tarugo inicial menos severa, e por impor carregamentos mais homogêneos ao material de origem do tubo durante o processo, espera-se um comportamento mais homogêneo da birrefringência acústica. Porém valores tão homogêneos e próximos de zero não foram relatados ou detectados pela literatura até o presente momento.

De forma contrária aos resultados observados no tubo com costura, esses baixos valores de birrefringência acústica somados a uma mínima variação do parâmetro ao longo da seção circunferencial do tubo, são de grande valia para aplicação da técnica ultra-sônica de medição de tensões. Pois no caso do tubo sem costura, um valor de birrefringência que representa o estado inicial do material, B₀ na Equação 3.9, pode representar de forma mais fiel todas as regiões analisadas do tubo. Além disso, a constatação de que os valores de birrefringência acústica neste tubo estão muito próximos de zero pode implicar na retirada do termo B₀ da Equação 3.9.

Com o intuito de fortalecer a afirmação de que o tubo sem costura poderia ser isotrópico, e que dessa maneira o termo B_0 da Equação 3.9 pudesse ser desconsiderado, foi realizada uma análise estatística das medidas de tempo realizadas nos dois tubos. A análise foi feita utilizando um teste de hipótese, no qual a hipótese nula era dizer que todas as medidas de tempo de percurso da onda ultrasônica realizadas na direção longitudinal eram estatisticamente iguais a todas as medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica realizadas na direção longitudinal eram estatisticamente iguais a todas as medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica realizadas na direção transversal do tubo sem costura. Dessa maneira estariam sendo levados em consideração os possíveis erros do equipamento eletrônico e os erros devidos ao acoplamento do transdutor. Pois as medidas foram realizadas em diversos pontos do tubo. A mesma

metodologia de teste foi realizada para o tubo com costura, sendo que nesse caso era esperada a rejeição da hipótese nula, ou seja, as medidas de tempo não poderiam ser consideradas estatisticamente iguais. Esse resultado para o tubo com costura já era evidente em função dos resultados de birrefringência acústica obtidos nesse tubo, que já indicavam uma anisotropia no mesmo. Os resultados dos testes estatísticos corroboraram de forma significativa para afirmação da isotropia acústica do tubo sem costura. Pois de acordo com as análises realizadas, ao avaliar o teste de hipótese para provar a igualdade estatística entre as médias das medidas de tempo nas direções longitudinal e transversal no tubo sem costura, haveria 99,52% de chance de erro ao se dizer que as medidas de tempo são estatisticamente diferentes, ou seja, as medidas de tempo nas duas direções de todos os pontos do tubo sem costura são estatisticamente iguais, o tubo sem costura é acusticamente isotrópico. Já no resultado do teste realizado com as medidas de tempo do tubo com costura haveria praticamente 0% (2,41E-11) de chance de erro ao dizer que os tempos são estatisticamente diferentes, ou seja, tem-se 100% de certeza de que medidas de tempo nas duas direções de todos os pontos do tubo com costura são estatisticamente diferentes, ou seja, o tubo com costura é acusticamente anisotrópico.

A grande vantagem em se retirar o termo B_0 da Equação 3.9 está no fato de que, caso esse tubo fosse utilizado em alguma aplicação após análises em laboratório, e se fosse possível obter medidas de birrefringência acústica nos mesmos pontos, essas medidas estariam diretamente ligadas a danos ou ao aumento do nível de tensões residuais neste tubo, pois a Equação 3.9 resumir-se-ia a:

$$\mathsf{B} = \mathsf{m}(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{5.1}$$

Sendo assim, a técnica ultra-sônica mostra-se como uma poderosa ferramenta para a avaliação de integridade de tubos sem costura utilizados no transporte de óleo e gás, pois suas medidas poderiam ser relacionadas diretamente com a presença de tensões residuais geradas no material durante sua operação.

Para que uma análise qualitativa e comparativa do estado de tensões residuais presentes nos tubos pudesse ser realizada, ambos os tubos foram cortados, pois de acordo com a literatura [24, 26], a resposta dos tubos ao final da etapa de corte pode ser associada ao estado de tensões residuais presentes, de forma que a abertura do tubo ao final do corte está relacionada a um perfil de tensões residuais trativas, enquanto o fechamento do tubo após o corte é associado a um estado de tensões residuais compressivas.

Os cortes para a avaliação do comportamento dos tubos foram realizados por oxi-corte. Ao final dos cortes, foram medidas as aberturas de ambos os tubos. O tubo sem costura apresentou uma abertura direta, de 13mm, referente a perda de material durante o corte e a um pequeno alívio de tensões, sem a necessidade de uma martelada para separação do material. No caso do tubo com costura, que não sofreu uma abertura direta no final do corte, foi possível medir uma abertura de 9,7mm referente somente a perda de material, após essa medição foi aplicada uma martelada ao tubo, que se abriu repentinamente, devido ao alívio das tensões residuais presentes no mesmo, junto com a abertura final, de 36,7mm, ocorreu um barulho também referente ao alívio de tensões do material. As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam as aberturas dos tubos sem costura e com costura após serem cortados, respectivamente.



Figura 5.11. Corte do tubo sem costura: vista longitudinal da abertura de 13mm gerada após perda de material e alívio de tensões residuais (a); vista da abertura de 13mm pela seção circular do tubo (b).

Após os cortes dos tubos, as regiões dos mesmos foram medidas novamente, agora na forma de tiras. As medidas foram realizadas nos mesmos pontos medidos das regiões, quando estas ainda faziam parte do tubo. Dessa forma também foi possível avaliar o estado das tensões residuais nos tubos, através do comportamento da birrefringência antes e após os cortes dos materiais. A Figura 5.13 apresenta o comportamento da birrefringência acústica ao longo da seção circular dos tubos, antes e depois dos cortes realizados.



(a) (b)





Figura 5.12. Corte do tubo com costura: abertura inicial de 9,7mm devido a perda de material (a); vista longitudinal da abertura de 36,7mm gerada após alívio de tensões residuais (b); vista da abertura de 36,7mm pela seção circular do tubo (c); detalhe da abertura final (d).



Figura 5.13. Comportamento da birrefringência acústica ao longo das regiões e tiras dos tubos com e sem costura.

Na Figura acima, nota-se o mesmo comportamento nas tiras obtidas dos dois tubos. Os valores de birrefringência acústica aumentaram em módulo, o que significa que a anisotropia acústica dos materiais aumentou, exceto nas tiras 9h e 12-h do tubo com costura. As etapas de corte realizadas para retirada das tiras após o alívio de tensões, obtido com o primeiro corte em cada um dos tubos, podem ter contribuído para essa mudança no comportamento acustoelástico das tiras.

5.3 – ENSAIO DE CARREGAMENTO UNIAXIAL DAS TIRAS DOS TUBOS

Após o corte dos tubos e das medidas de tempo de percurso para calcular a birrefringência nos pontos das tiras, foram realizados ensaios de carregamento uniaxial em cada uma das tiras dos tubos para avaliar o comportamento dos tubos quando expostos a tensão.

A Figura 5.14 apresenta a resposta das tiras do tubo com costura quando expostas a um carregamento uniaxial trativo. Na figura também são apresentadas as equações das retas obtidas pelos resultados do ensaio, cabe lembrar que os coeficientes angulares das retas apresentadas são as constantes acustoelásticas de cada uma das tiras do tubo com costura.



Figura 5.14. Comportamento da birrefringência acústica medida nas tiras do tubo com costura durante ensaio de tração uniaxial.

Em vista do exposto acima, fica claro que as regiões do tubo com costura apresentam comportamentos distintos quando expostas a tensão. Foi realizado um cálculo teórico para verificar qual a influência dos valores de B₀, obtidos no tubo com

costura, nos valores de tensão calculados a partir da Equação 3.9. Os valores dos outros parâmetros utilizados na equação foram obtidos de uma da tiras ensaiadas.

Dada a Equação 3.9:

$$\mathsf{B} = \mathsf{B}_0 + \mathsf{m}(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{3.9}$$

Levando-se em consideração que o valor de B a ser utilizado na equação foi obtido do ensaio de carregamento uniaxial, temos σ_2 =0.

Adotando-se os valores:

$$>$$
 B₀ = -6,52x10⁻³

>
$$B = -3,48 \times 10^{-3};$$

 \blacktriangleright m = 8,36x10⁻⁵ (Kgf/mm²)⁻¹.

Calculando σ para B₀ = -6,52x10⁻³, tem-se:

$$\sigma = \frac{\mathsf{B} - \mathsf{B}_0}{\mathsf{m}} = 36,4 \, \mathrm{Kgf} / \mathrm{mm^2}$$

Ao realizar-se o mesmo cálculo para $B_0 = -8,23 \times 10^{-3}$ tem-se:

$$\sigma = \frac{\mathsf{B} - \mathsf{B}_0}{\mathsf{m}} = 56,8 \, \mathrm{Kgf} / \mathrm{mm^2}$$

A diferença entre os valores de tensão calculada utilizando os valores mínimo e máximo de B_0 no tubo com costura é de 20,4Kgf/mm², aproximadamente 200MPa, enquanto o limite de escoamento de aços API 5L X46 é de 317MPa. A diferença entre esses valores de tensão é significativa e indica o risco que existe em se adotar um parâmetro B_0 que represente seguramente o comportamento global da birrefringência acústica no tubo com costura. Dessa maneira, a aplicação da técnica ultra-sônica para medição de tensões em tubos com costura necessita transpor esse obstáculo para sua aplicação nesses tipos de materiais.

A Figura 5.15 apresenta a resposta das tiras do tubo com costura quando expostas a um carregamento uniaxial trativo. Na figura também são apresentadas as equações das retas obtidas pelos resultados do ensaio. Da mesma forma que na figura anterior, os coeficientes angulares das retas apresentadas são as constantes acustoelásticas de cada uma das tiras do tubo com costura.



Figura 5.15. Comportamento da birrefringência acústica medida nas tiras do tubo sem costura durante ensaio de tração uniaxial.

Da mesma forma que no tubo com costura, as regiões do tubo sem costura apresentam comportamentos distintos quando expostas à tensão, contudo, as retas mostraram-se mais próximas do que as obtidas no ensaio de tração das tiras do tubo com costura. Este pode ser um indicativo que os valores de tensão variam menos entre as tiras do tubo sem costura. Também foi realizado um cálculo teórico para verificar qual a influência dos valores de B₀, obtidos no tubo sem costura, nos valores de tensão calculados a partir da Equação 3.9. Os valores dos outros parâmetros utilizados na equação foram obtidos de uma da tiras ensaiadas.

Dada a Equação 3.9:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{m}(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{3.9}$$

Levando-se em consideração que o valor de B a ser utilizado na equação foi obtido do ensaio de carregamento uniaxial, temos $\sigma_2=0$.

Adotando-se os valores:

>
$$B_0 = 3,23 \times 10^{-4};$$

>
$$B = -2,72 \times 10^{-3};$$

> $m = 8,11 \times 10^{-5} (Kgf/mm^2)^{-1}$.

Calculando σ para B₀ = 3,23x10⁻⁴, tem-se:

$$\sigma = \frac{B - B_0}{m} = 37,5 \text{ Kgf/mm}^2$$

Ao realizar-se o mesmo cálculo para $B_0 = -5,38 \times 10^{-4}$ tem-se:

$$\sigma = \frac{B - B_0}{m} = 26,9 \text{ Kgf}/\text{mm}^2$$

A diferença entre os valores de tensão calculada utilizando os valores mínimo e máximo de B_0 no tubo sem costura é de 10,6Kgf/mm², aproximadamente 110MPa, enquanto o limite de escoamento de aços API 5L X46 é de 317MPa. A diferença entre esses valores de tensão é quase metade do valor calculado pelo tubo com costura, mas ainda é significativa.

Ressalta-se que, a variação no comportamento acustoelástico observada nas tiras do tubo sem costura durante o ensaio de tração uniaxial, pode estar associada às etapas de corte realizadas no tubo para a obtenção dos corpos-de-prova. Ou seja, o processo de corte pode ter alterado a distribuição de tensões residuais e deformações no material, sendo assim, os corpos-de-prova utilizados deixariam de representar de forma efetiva o comportamento acustoelástico esperado para o tubo sem costura. Dessa forma, o ensaio de tração pode não ser o ideal para avaliar o comportamento dos tubos quando expostos a tensão, até mesmo porque em tubulações, as tensões mais preocupantes, na maioria dos casos, são as tensões circunferenciais (*Hoop-stresses*), pois trincas tendem a surgir nas direções longitudinais das tubulações.

O ideal seria utilizar um ensaio de carregamento onde fosse possível submeter o tubo, e não corpos-de-prova, a tensões nas direções longitudinal e transversal ao mesmo tempo, avaliando de forma mais adequada o comportamento global da birrefringência acústica do tubo. Desta maneira, acredita-se que testes hidrostáticos seriam capazes de atender essa necessidade.

5.4 – CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS TUBOS

Com as informações obtidas nos resultados de medição de birrefringência acústica nos tubos e pela análise estatística das medidas comprovou-se o comportamento isotrópico do tubo sem costura. Esses resultados mostraram que existe uma diferença no comportamento acústico de tubos da mesma especificação, obtidos por processos de fabricação diferentes. Para contribuir com a afirmação anterior, foi realizada a caracterização microestrutural de amostras retiradas de regiões dos tubos com e sem costura, com o intuito de identificar possíveis diferenças microestruturais que pudessem ser atribuídas ao comportamento acústico dos tubos.

As amostras foram retiradas das regiões denominadas 6h nos tubo com e sem costura, pois foi nessas regiões dos dois tubos que os valores de birrefringência foram maiores em módulo, o que implica dizer que foram as regiões onde os tempos medidos nas duas direções dos pontos apresentaram maiores diferenças. Cabe ressaltar que foram retiradas duas amostras de cada região dos tubos, uma na direção longitudinal e outra na direção transversal, coincidentes com as direções que foram adotadas para as medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica nos pontos dos tubos.

A Figura 5.16 apresenta as micrografias obtidas das amostras retiradas nas direções longitudinal e transversal do tubo com costura, com o ataque metalográfico realizado com o reagente Nital 2%.



Figura 5.16. Micrografias das amostras retiradas do tubo com costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal. Ataque: Nital 2%.

A microestrutura do material é composta de ferrita e perlita, o que está de acordo com a literatura [1] que diz que até a classificação API 5L X56, os aços utilizados ainda são aços carbono. É possível notar na amostra longitudinal uma microestrutura típica de um aço obtido por laminação controlada, com grãos finos de ferrita e perlita fina, o que também está de acordo com a literatura [3]. Além disso, a presença de perlita alinhada na microestrutura era esperada, pois a direção longitudinal é coincidente com a direção de laminação da chapa que deu origem ao tubo.

A Figura 5.17 apresenta as micrografias obtidas das amostras retiradas nas direções longitudinal e transversal do tubo com costura, com o ataque metalográfico realizado com o reagente Beraha, proporcionando um ataque colorido da amostra através da deposição filmes finos de sulfetos sobre as fases da amostra [38]. O ataque coloriu os grãos de ferrita nas cores branco, laranja e azul, a perlita apresentou um tom avermelhado. A vantagem do ataque colorido em relação ao realizado com Nital 2% é realçar de forma mais efetiva a distribuição dos grãos de ferrita.





(c) (d) Figura 5.17. Micrografias das amostras retiradas do tubo com costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal. Ataque: Beraha.

Das micrografias mostradas anteriormente, é possível notar que, ao contrário do que revelou a microestrutura da amostra longitudinal, na amostra transversal não foi identificado um alinhamento preferencial da perlita, esta se encontra distribuída ao longo da seção transversal de forma aleatória.

A diferença na orientação do bandeamento da perlita nas duas amostras do tubo leva a crer que um dos fatores que contribuiu para anisotropia acústica do tubo com costura foi a diferença nos tamanhos de grão de ferrita nas amostras do tubo.

A Figura 5.18 apresenta as micrografias obtidas das amostras retiradas nas direções longitudinal e transversal do tubo sem costura, com o ataque metalográfico realizado com o reagente Nital 2%. A microestrutura do material também é composta de ferrita e perlita, como esperado pela literatura para aços API 5L X46 [1].

A microestrutura apresentada é típica de um tratamento térmico de normalização, com grãos finos de ferrita e perlita fina, o que também está de acordo com a literatura no que tange aspectos de tratamentos térmicos realizados nestes tubos [1].

Os grãos de ferrita mostram-se distribuídos entre linhas de perlita fina. A perlita mostra-se com um alinhamento muito mais homogêneo do que o apresentado no tubo com costura, o que pode estar relacionado com o processo de fabricação do tubo sem costura.

Ao contrário do que revelou a microestrutura da amostra transversal do tubo com costura, na amostra transversal do tubo sem costura foi identificado o mesmo alinhamento preferencial da perlita identificado na microestrutura da amostra longitudinal do tubo sem costura, ou seja, as microestruturas nas direções longitudinal e transversal do tubo sem costura são praticamente idênticas, este é mais um fator que corrobora para a afirmação da isotropia do tubo sem costura. Neste caso, diz-se que o tubo é acusticamente isotrópico, pois as medidas de tempo realizadas em duas direções ortogonais no material eram estatisticamente iguais, e a caracterização microestrutural de amostras nessas direções mostrou a igualdade das microestruturas.



Figura 5.18. Micrografias das amostras retiradas do tubo sem costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal. Ataque: Nital 2%

A Figura 5.19 apresenta as micrografias obtidas das amostras retiradas nas direções longitudinal e transversal do tubo sem costura, com o ataque metalográfico realizado com o reagente Beraha. O ataque coloriu os grãos de ferrita nas cores amarelo, marrom e azul, a perlita apresentou com um tom avermelhado. Da mesma forma que nas amostras do tubo com costura, o ataque colorido mostrou-se vantajoso em relação ao realizado com Nital 2% ao realçar de forma mais efetiva a distribuição dos grãos de ferrita.





(c) (d) Figura 5.19. Micrografias das amostras retiradas do tubo sem costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal. Ataque: Beraha.

A similaridade na orientação dos grãos nas duas amostras do tubo leva a crer que este foi um dos fatores que contribuiu para isotropia acústica do tubo sem costura.

A Tabela 5.2 apresenta os tamanhos de grão e as frações volumétricas dos constituintes microestruturais das amostras retiradas dos tubos com e sem costura segundo as normas ASTM E1382 [36] e ASTM E562 [37].

Tubo	Direção —	Tamanho de Grão		Fração Volumétrica		
		ASTM	Mm	Ferrita (%)	Perlita (%)	
Com Costura	Longitudinal	11	7,1	80,47	19,53	
	Transversal	10	10,0	74,82	25,18	
Sem Costura	Longitudinal	10	10,0	72,22	27,77	
	Transversal	10	10,0	71,38	28,62	

Tabela 5.2 – Tamanho de grão e fração volumétrica dos constituintes microestruturais das amostras longitudinal e transversal dos tubos com e sem costura.

Segundo a literatura [39], em regiões onde o tamanho de grão e a fração volumétrica da ferrita são maiores, a velocidade de propagação da onda ultra-sônica é maior, ou seja, o tempo de percurso da onda ultra-sônica é menor. De acordo com os resultados de tamanho de grão e fração volumétrica das amostras longitudinal e transversal do tubo com costura, pode-se observar que, apesar do tamanho de grão na amostra longitudinal ser um pouco menor do que o tamanho de grão da amostra transversal, a fração volumétrica da ferrita é maior na amostra longitudinal, isto poderia explicar os valores negativos de birrefringência acústica em todas as regiões do tubo com costura, pois o tempo medido na direção longitudinal é menor do que na transversal.

Como era esperado, para o tubo sem costura, o tamanho dos grãos ferríticos é o mesmo e as frações volumétricas são muito parecidas nas duas amostras. Como apenas uma região do tubo foi analisada, talvez uma amostragem maior pudesse mostrar que em algumas regiões a fração volumétrica é um pouco maior na direção longitudinal e em outras ela é um pouco maior na direção transversal, dessa maneira os tempos não seriam sempre maiores em uma direção ou na outra, ao longo da seção circunferencial do tubo, o que explicaria as oscilações entre valores positivos e negativos de birrefringência acústica ao longo da seção circular do tubo sem costura.

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para uma investigação mais detalhada dos constituintes microestruturais presentes nas amostras, devido a capacidade de gerar grandes ampliações com boa resolução. A Figura 5.20 apresenta micrografias realizadas com microscópio eletrônico de varredura nas amostras longitudinal e transversal do tubo com costura. Na amostra longitudinal nota-se o alinhamento da perlita fina, devido a laminação da chapa que deu origem ao tubo. Foram identificadas algumas regiões espalhadas pela amostra que podem ser associadas à presença de inclusões, porém essas não foram identificadas pois podem ter sido arrancadas durante a preparação da amostra. Nota-se também o detalhe da perlita fina resultante do tratamento térmico de normalização realizado durante a fabricação do tubo. Na amostra transversal foram identificadas regiões similares às encontradas na amostra longitudinal, porém nesse caso, foram encontradas inclusões em algumas das cavidades da amostra. As micrografias também revelam o detalhe da perlita fina resultante do tratamento térmico de normalização realizado durante a fabricação do tubo.



Figura 5.20. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura nas amostras do tubo com costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal.

A Figura 5.21 apresenta micrografias realizadas com microscópio eletrônico de varredura nas amostras longitudinal e transversal do tubo sem costura. Na amostra longitudinal é possível notar o alinhamento da perlita e sua característica típica resultante do tratamento térmico de normalização. Também é possível notar o alinhamento da perlita na amostra transversal. Foram identificadas inclusões nos grão de ferrita desta amostra. As micrografias também revelam o detalhe da perlita fina resultante do tratamento térmico de normalização realizado durante a fabricação do tubo.



Figura 5.21. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura nas amostras do tubo sem costura: (a) e (b) referentes à direção longitudinal; (c) e (d) referentes à direção transversal.

Uma análise semiquantitativa por EDS foi realizada com o intuito de determinar se os aços utilizados no presente trabalho apresentavam composições químicas semelhantes, de modo a verificar se os tubos atendiam a mesma especificação, nesse caso, API 5L X46, que são aços ao carbono sem adição de elementos de liga.

As Figuras 5.22 e 5.23 apresentam os espectros de EDS realizados nas amostras transversais dos tubos com e sem costura. Pode-se assumir que ambos os tubos atendem a especificação de aços API 5L X46, pois além de apresentarem microestruturas típicas de normalização, que é o tratamento térmico realizado para essa classe de aços, não foram identificados elementos de liga obrigatórios em aços do tipo alta resistência baixa liga (ARBL).



Figura 5.28. Espectro de EDS obtido da amostra transversal do tubo com costura.



Figura 5.29. Espectro de EDS obtido da amostra transversal do tubo sem costura.

5.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

As medidas iniciais de birrefringência apontaram para comportamentos acústicos distintos nos tubos. O tubo com costura apresentou uma anisotropia acústica considerável e não homogênea ao longo de sua circunferencial, mostrando que cada região do tubo se comportava como um material com características mecânicas distintas entre si, isso foi comprovado durante a realização dos ensaios de carregamento. Nesse caso, um único valor de birrefringência acústica não representaria de forma segura o comportamento do tubo. O tubo sem costura, por sua vez, apresentou valores de birrefringência acústica homogêneos e próximos de zero, implicando na isotropia do material, que foi comprovada através da análise estatística das medidas de tempo realizadas em todos os pontos do tubo. O ensaio de carregamento das tiras deste tubo mostrou um comportamento distinto das regiões do tubo quando expostas a tração, nesse caso, as variações nos valores de tensão ao se escolher um valor inicial de birrefringência são menores que as apresentadas pelo tubo com costura, mas mesmo assim são significativas. A caracterização microestrutural corroborou de forma significativa com a comprovação da anisotropia do tubo com costura e com a afirmação da isotropia acústica do tubo sem costura.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo a avaliação acustoelástica de tubos de aço API 5L X46 fabricados por diferentes processos, utilizados no transporte de óleo e gás. As medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica foram realizadas com o equipamento portátil desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN). O programa experimental visou provar que existem diferenças significativas no comportamento acustoelástico dos tubos, quando comparado um com o outro. A seguir serão apresentadas as principais conclusões do presente trabalho:

- A utilização do equipamento portátil para medição do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas mostrou-se satisfatória;
- A partir dos resultados de birrefringência acústica obtidos no tubo com costura e após a análise estatística realizada nos mesmos, comprovou-se o comportamento anisotrópico do tubo com costura;
- A partir dos resultados de birrefringência acústica obtidos no tubo sem costura e após a análise estatística realizada nos mesmos, comprovou-se o comportamento isotrópico do tubo sem costura;
- A retirada de tiras para serem usadas como corpos-de-prova nos ensaios de carregamento uniaxial trativo podem ter alterado o comportamento acústico dos tubos;
- A caracterização microestrutural realizada nas amostras dos tubos corroborou de forma significativa para confirmar a diferença no comportamento acústico dos tubos estudados;
- A técnica ultra-sônica para medição de tensões pode ser utilizada como ferramenta de integridade para tubos sem costura.

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados e análises do presente trabalho, são apresentadas algumas sugestões e recomendações que podem ser úteis para eventuais estudos sobre o tema abordado.

Sugere-se aumentar o número de tubos sem costura para confirmação do comportamento isotrópico destes tubos.

Para verificar o estado de tensão do tubo sugere-se analisar anisotropia acústica do tubo antes e após a realização de um corte longitudinal no mesmo, entretanto, sem seu seccionamento em tiras.

Recomenda-se a realização de ensaios hidrostáticos ou ensaios de trassão ou compressão com o tubo inteiro ao invés de ensaios de tração onde o tubo tenha que ser destruído para obtenção dos corpos-de-prova. Com os ensaios hidrostáticos o comportamento acústico inicial dos tubos seria preservado.

Deve-se aumentar os estudos relacionando os efeitos da microestrutura dos materiais no comportamento da birrefringência acústica dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SILVA TELLES, P.C., *Tubulações Industriais: Materiais, Projeto e Desenho.* 10^a ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2003.

[2] MELLO, J.S., *Evolução do Estado de Tensões Residuais em um tubo de Aço API 5L X-70.* Dissertação de M.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

[3] PEREIRA, L.C., *Desenvolvimento e Caracterização de Aços de Baixa Liga e Alta Resistência Destinados à fabricação de Tubos API de Grau Superior*^{*}. Tese de D.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994.

[4] API 5L, Specification For Line Pipe, 42ª ed., 2000.

[5] HASHMI, M.S.J., "Aspects of the tube and pipe manufacturing processes: Meter to nanometer diameter". *Journal of Materials Processing Technology*, v 179, n. 3, pp. 5-10, Oct. 2006.

[6] REGGIO, M., McKENTY, F., GRAVEL, L., *et al*, "Computational Analysis of the Process for Manufacturing Seamless Tubes". *Applied Thermal Engineering*, v 22, n. 4, pp. 459-470, Mar. 2002.

[7] HAN, Z. W., LIU, C., LU, W.P., *et al*, "Experimental Investigation and Theoretical Analysis of Roll Forming of Eletrical Resistance Welded Pipes". *Journal of Materials Processing Technology*, v 145, n. 3, pp. 311-316, Feb. 2004.

[8] MONDENESI, P. J., *Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico*.
 <u>http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf</u>, 2003.
 Acessado em Setembro de 2005.

[9] RAJ, B., JAYAKUMAR, T., "NDE Methodologies for Characterisation of Defects, Stresses and Microstructures in Pressure Vessels and Pipes". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v 73, n. 2, pp. 133-146, Sep. 1997. [10] GUROVA, T. Variação do Estado de Tensões Residuais Introduzidas por Shot-Peening Durante deformação Plástica por Tração Uniaxial em Aços. Tese de D.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.

[11] PATRÍCIO, L. C., Análise de Tensões por Ultra-Som Através da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua. Tese de D.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

[12] ANDREUCCI, R., Ensaio por Ultra-som.

http://www.infosolda.com.br/download/20ddr.pdf 2003. Acessado em Setembro de 2005.

[13] TANALA, E., BOURSE, G., FREMIOT, M., *et al*, "Determination of Near Surface Residual Stresses on Welded Joints Using Ultrsonic Methods". *NDT & E International*, v 28, n. 2, pp. 83-88, Apr. 1995.

[14] BITTENCOURT, M.S.Q., Desenvolvimento de um Sistema de Medida de Tempo Decorrido na Onda Ultra-Sônica e Análise do Estado de Tensões em Materiais Metálicos pela Técnica da Birrefringência Acústica. Tese de D.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

[15] HUGHES, D.S., KELLY, J.K., "Second Order Elastic Deformation of Solids", *Physical Review*, v. 92, n. 5, pp. 1145-1149, Dec. 1953.

[16] NIKITINA, N.Y., OSTROVSKY, L.A., "An Ultrasonic Method for Measuring Stresses in Engineering Materials". *Ultrasonics*, v. 35, n. 8, pp.605-610, Jan. 1998.

[17] BITTENCOURT, M.S.Q., PAYÃO, J.C., LAMY, C.A., *et al*, "Medida de Tempo de Percurso da Onda Ultra-Sônica para Avaliação de Tensões". In: *III Conferência Pan-Americana de Ensaios Não Destrutivos (PANNDT)*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 02-06 Junho 2003.

[18] SCHNEIDER, E., "Ultrasonic Birrefringence Effect – Its Application for Materials Characterisations". *Optics and Lasers in Engineering*, v 22, n. 4, pp. 305-323, 1995.

[19] HIRAO, M., PAO, Y., "Dependence of Acoustoelastic Birrefringence on Plastic Strains in a Beam". *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 77, n. 5, pp.1659-1664, May 1985.

[20] TODA, H., FUKOKA, H., OHMORI, H., "Variations in Texture Induced Acoustic Anisotropy Due to Compressive Deformations (Influence of Strain-rate and Temperature)". *Journal of Materials Science Society of Japan*, v. 31, n. 342, pp. 238-243. Mar. 1982.

[21] PANETTA, P.D., ALERS, G.A., "Characterization of Plastically Deformed Steel Utilizing Ultrasonic Velocity and Attenuation Measurements". *Review of Progress in Quantitative Nodestructive Evaluation*, v. 20, pp.1494-1500, Apr. 2001.

[22] ALERS, G.A., McCOLSKEY, J.D., "Measurement of Residual Stress in Bent Pipelines". *Review of Quantitative Nodestructive Evaluation*, v. 21, pp.1681-1687, May 2002.

[23] PANETTA, P.D., FRANCINI, B., MORRA, M. *et al*, "Characterization of Plastically Deformed Steel Utilizing EMAT Ultrasonic Velocity Measurements". *Review of Quantitative Nodestructive Evaluation*, v. 22, pp.1516-1522, Mar. 2003.

[24] AMIRAT, A., MOHAMED-CHATEAUNEUF, A., CHAOUI, K., "Reliability Assessment of Underground Pipelines Under the Combined Effect of Active Corrosion and Residual Stress". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v 83, n. 2, pp. 107-117, Feb. 2006.

[25] LAW, M., PRASK, H., LUZIN, V., *et al*, "Residual Stress Measurements in Coil, Linepipe and Girth Welded Pipe". *Materials Science and Engineering: A*, v 437, n. 1, pp. 60-63, Nov. 2006.

[26] CLAPHAM, L., KRAUSE, T.W., OLSEN, H., *et al*, "Characterization of Texture and Residual Stress in a Section of 610mm Pipeline Steel". *NDT & E International*, v 28, n.
2, pp. 73-82, Apr. 1995.

[27] LEGGATT, R.H., "Residual Stresses at Circumferential Welds in Pipes". *The Welding Institute Research Bulletin*, pp. 181-182, 1982.

[28] VAIDYANATHAN, S; TODARO, A F; FINNIE, I, "Residual stresses due to circumferential welds (axisymmetric thin shells)". *Journal of Engineering Materials Technology*, v. 95, pp. 233-237, Oct. 1973.

[29] FUJITA, Y., NOMOTO, T., HASEGAWA, H., "*Deformation and Residual Stresses in Butt-Welded Pipes and Spheres*". IIW Doc. X-963-80, pp. 1-16April, 1980

[30] LAW, M., GNAËPEL-HEROLD, T., LUZIN, V., *et al*, "Neutron Residual Stress Measurements in Linepipe". *Physica B: Condensed Matter*, v 385, n. 2, pp. 900-903, Nov. 2006.

[31] BITTENCOURT, M.S.Q., MEDEIROS, R.C., LAMY, C.A., *et al*, "Avaliação por Ultra-som das Tensões Impostas em Tubo API X65". *Rio Pipeline 2003 Conference and Exposition*, IBP452_03, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 22-24 Outubro 2003.

[32] BITTENCOURT, M.S.Q., 2006, *Avaliação por Ultra-som de Tensões em Dutos*, Petrobrás, contrato nº 6502247035.

[33] CARDOSO, B.R., PAYÃO, J.C., BITTENCOURT, M.S.Q., *et al*, "Estudo da Acustoelasticidade de Tubos Sem Costura Usados no Transporte de Óleo e Gás". *Rio Oil & Gas 2006 Expo and Conference*, IBP1789_06, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 11-14 Setembro 2006.

[34] MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 3rd ed. New York, John Wiley & Sons, 2002.

[35] LAPPONI, J.C., *Estatística usando Excel 5 e 7*, Editado por Lapponi Treinamento e Editora Ltda, ISBN 85-85624-08-6, Agosto 1998.

[36] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (2004) Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis. ASTM Testing Designation: E 1382.

[37] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (2002) *Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count.* ASTM Testing Designation: E 562.

[38] BERAHA, E., SHPIGLER, B., *Color Metallography*, 1^a ed. Ohio, American Society for Metals, 1977.

[39] GÜR, C.H., TUNCER, B.O., *Investigating the microstructure-ultrasonic property relationships in steels*, <u>http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/materials_characterization/138_gur.pdf</u>,

acessado em Outubro de 2006