



COPPE/UFRJ

ANÁLISE DE TENSÕES COM ULTRA-SOM EM TUBOS SOLDADOS

Priscila Goreti Magina

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador(es): João da Cruz Payão Filho

Rio de Janeiro

Março de 2009

ANÁLISE DE TENSÕES COM ULTRA-SOM EM TUBOS SOLDADOS

Priscila Goreti Magina

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. João da Cruz Payão Filho - D.Sc.

Dr. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt - D.Sc

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello - D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2009

Magina, Priscila Goreti

Análise de tensões com ultra-som em tubos soldados/
Priscila Goreti Magina. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,
2009.

XIII, 100 p.: il.; 1,3 cm.

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 92-97.

1. Efeito acustoelástico. 2. Birrefringência acústica. 3.
Tensões. I. Payão, João da Cruz. II. Universidade Federal
do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

Ao Leonardo, à minha família, à Michelin e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

À COPPE, ao IEN e a APOLO Tubulars pelo apoio.

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

Aos funcionários da APOLO Tubulars, Igor, Boni e Luis Melo pela contribuição nas análises e informações prestimosas.

Ao diretor da APOLO Tubulars, Wilson Rosa, por acreditar e incentivar a pesquisa científica.

Ao Dr. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, por incentivar o trabalho, colaborando de forma ímpar para o meu esclarecimento.

Aos mestres Nilson José dos Santos e Nilson Brandalise, da UFF, que muito me ajudaram e esclareceram.

Aos funcionários do IEN, Manuel e Geraldo, que contribuíram para a execução dos ensaios e aos bolsistas Douglas e Carla, com a amizade.

Ao Carlos Rangel, meu chefe, que me incentiva, colabora, me orienta como profissional e também exemplifica muitas atitudes pessoais.

A todos da Michelin, sempre compreensivos e solícitos a me ajudarem.

À Carol, que por diversas vezes me emprestou sua casa e sua cama para que eu pudesse estudar.

À minha família, que sempre esteve presente nos momentos que precisei.

Ao meu amigo e amor, Leonardo, sempre paciente ao meu lado, me dando ânimo para continuar.

Aos amigos espirituais e a Deus, por permitirem chegar até aqui com o auxílio necessário e a certeza de cumprir essa tarefa.

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

ANÁLISE DE TENSÕES COM ULTRA-SOM EM TUBOS SOLDADOS

Priscila Goreti Magina

Março / 2009

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Este trabalho apresenta uma análise de tensões pela técnica ultra-sônica em tubos API 5L X70 fabricados pelo processo ERW, utilizados no transporte de óleo e gás. O programa experimental consistiu da determinação da birrefringência acústica em diferentes pontos de chapas e tubos retirados do início e fim de 2 bobinas de fabricação. Além disso, foram feitos ensaios de acustoelasticidade em 2 pontos das bobinas, nas direções longitudinal e transversal, para analisar a homogeneidade da mesma, e análise microestrutural. Os resultados mostram um comportamento anisotrópico da chapa e do tubo, e uma uniformidade dos resultados da constante acustoelástica do material, o que possibilita a utilização da técnica ultra-sônica como ferramenta para avaliação de integridade estrutural da rede dutoviária.

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

TENSION ANALYSIS WITH ULTRASONIC IN PIPES WELDED

Priscila Goreti Magina

March / 2009

Advisor: João da Cruz Payão Filho

Department: Metallurgy and Materials Engineering

This work presents a tensions analysis with ultrasonic technique in pipes API 5L X70 manufactured by the process ERW, used in the oil and gas transportation. The experimental program consisted of birefringence acoustics determination in plates and pipes different points of the beginning and end of 2 production bobbins. Moreover, acoustoelastic rehearsals in 2 bobbins points were done, in the longitudinal and transversal directions, to analyze the homogeneity the same, and analysis microstructural. The results show a behavior anisotropy of the plate and of the pipe, and an uniformity of the material constant acoustoelastic results, what enables the utilization of the ultrasonic technique as tool for net pipeline structural integrity evaluation.

SUMÁRIO

Lista de figuras

Lista de tabelas

1. Introdução	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivo da pesquisa	2
1.3. Escopo do trabalho	2
2. Revisão bibliográfica	3
2.1. MATERIAIS UTILIZADOS EM TUBOS	3
2.1.1. Tubos para dutos	4
2.1.1.1. Efeito dos elementos de liga nos aços	5
2.1.1.2. Efeito do refino de grão no material	6
2.1.2. Aços API 5L	8
2.2. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE TUBOS	9
2.3. SOLDAGEM POR INDUÇÃO	14
2.4. ANÁLISE DE TENSÕES	17
2.4.1. Tensões residuais	17
2.4.2. Técnicas de medição de tensões	18
2.4.3. Ultra-som	20
2.4.3.1. Tipos de onda	20
2.4.3.2. Geração de ondas	22
2.4.3.3. Propagação de ondas acústicas	23
2.4.3.4. Técnicas de inspeção	25
2.4.3.5. Birrefringência acústica e acustoelasticidade	26
2.5. APLICAÇÃO DA TÉCNICA ULTRA-SÔNICA PARA MEDIÇÃO DE TENSÃO	30
2.6. Considerações finais	38
3. Materiais e métodos	39
3.1. Considerações iniciais	39
3.2. Material de estudo	39
3.3. Caracterização química e mecânica	39
3.4. Caracterização microestrutural	41

3.5. Equipamentos utilizados para aquisição do tempo de onda	42
3.6. Medição da constante acustoelástica	44
3.7. Medição da birrefringência acústica	48
3.8. Considerações finais	56
4. Resultados e discussões	57
4.1. Considerações iniciais	57
4.2. Caracterização microestrutural do material	57
4.3. Levantamento da constante acustoelástica	59
4.4. Medição da birrefringência acústica da chapa	67
4.5. Medição da birrefringência acústica no tubo	76
4.6. Considerações finais	90
5. Conclusão e propostas de estudo	91
6. Bibliografia	92
7. Anexo I	98
8. Anexo II	99

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Infra-estrutura necessária para o cenário de crescimento petrolífero (Fonte: [1]).
- Figura 2 – Classificação dos aços utilizados em tubos, conforme SAGE.
- Figura 3 – Variações estruturais na laminação controlada: a) os efeitos da temperatura na resistência da estrutura, b) as diferenças da estrutura com o tempo de processamento.
- Figura 4 – Processos de fabricação de tubos.
- Figura 5 – Processo de conformação a quente sem solda: a) por extrusão, b) por laminação (Processo Mannesmann).
- Figura 6 – Esquema do processo UOE.
- Figura 7 – Processo de conformação a quente com solda longitudinal.
- Figura 8 – Processo de fabricação ERW.
- Figura 9 – Confecção de bordas.
- Figura 10 – Esquema de fabricação SAW helicoidal.
- Figura 11 – Processo de conformação a quente com solda espiral.
- Figura 12 – Diferença entre as aplicações: a) baixa frequência, b) alta frequência.
- Figura 13 – Soldagem por indução em tubo.
- Figura 14 – Demonstração do processo de soldagem por indução.
- Figura 15 – Sequência do processo de soldagem.
- Figura 16 – Onda longitudinal.
- Figura 17 – Onda transversal.
- Figura 18 – Campo sônico próximo ao cristal.
- Figura 19 – Classificação das zonas do campo sônico.
- Figura 20 – Técnicas de inspeção: a) pulso-eco, b) e c) transparência, d) imersão.
- Figura 21 – Variação das constantes elásticas com a mudança de polarização da direção da onda.
- Figura 22 – Esquema do trabalho: a) Placas chanfradas para soldagem FCAW-G, b) forma de avaliação da onda.
- Figura 23 – Valores de tensão médios medidos antes (vermelho) e após (azul) o alívio de tensões.
- Figura 24 – Posicionamento das tiras no tubo.

- Figura 25 – Marcação do tubo: a) na direção circunferencial, b) direção longitudinal.
- Figura 26 – Material de estudo: a) tubos soldados, b) chapas
- Figura 27 – Microscópio óptico utilizado nas análises metalográficas.
- Figura 28 – Esquema de aquisição de dados.
- Figura 29 – Esquema de aquisição de dados.
- Figura 30 – Software de aquisição de dados: a) quadro do *Chronos* fazendo a interpolação, b) aquisição do tempo de onda.
- Figura 31 – Corpo-de-prova para levantamento da constante acustoelástica.
- Figura 32 – Aquisição dos tempos de onda durante o carregamento.
- Figura 33 – Esquema da tira medida.
- Figura 34 – Regiões dos tubos analisados.
- Figura 35 – Gráfico de regressão: $Y = a + b X$.
- Figura 36 – Planilha de estatística: a) verificação da normalidade, b) Statgraphics.
- Figura 37 – Medição da perda do material pelo processo de oxi-corte.
- Figura 38 – a) processo de corte automático sem interferência da temperatura, b) medição da abertura total do tubo.
- Figura 39 – Medição da birrefringência acústica nos mesmos pontos.
- Figura 40 – Macrografia das bobinas: a) 6627, b) 6628.
- Figura 41 – Micrografia das amostras: a)6627, b)6628.
- Figura 42 – Análise metalográfica estrutural: a e c) bobina 6627, b e d)bobina 6628.
- Figura 43 – Resultados dos ensaios de acustoelasticidade de 4 corpos-de-prova de aço API 5L X70 no sentido longitudinal ao sentido de laminação.
- Figura 44 – Resultado encontrado em diversos tubos API 5L X70 por Bittencourt et al.
- Figura 45 – Modo de bobinamento.
- Figura 46 – Resultados dos ensaios de acustoelasticidade de 4 corpos-de-prova de aço API 5L X70 no sentido transversal ao sentido de laminação.
- Figura 47 – Esquema de pontos da chapa.
- Figura 48 – Comportamento da birrefringência acústica na chapa 1: a) ao longo do início da bobina, b) ao longo do fim da bobina.
- Figura 49 – Comportamento da birrefringência acústica da chapa 2: a) ao longo do início da bobina, b) ao longo do fim da bobina.
- Figura 50 – Comportamento da birrefringência acústica ao longo da chapa 1: a) primeira fileira, b) segunda fileira, c) terceira fileira, d) quarta fileira, e) quinta fileira, f) sexta fileira.

- Figura 51 – Comportamento da birrefringência acústica ao longo da chapa 2: a) primeira fileira, b) segunda fileira, c) terceira fileira, d) quarta fileira, e) quinta fileira, f) sexta fileira.
- Figura 52 – Análise de regressão da chapa 1.
- Figura 53 – Curva de hipótese para o fim das bobinas.
- Figura 54 – Dispersão da tensão ao longo da chapa.
- Figura 55 – Esquema da ordem de medida do tubo.
- Figura 56 – Comportamento da birrefringência acústica ao longo do comprimento do tubo: a) início bobina 6627, b) fim bobina 6627, c) início bobina 6628, d) bobina 6628.
- Figura 57 – Comportamento da birrefringência acústica ao longo do diâmetro do tubo: a) início bobina 6627, b) fim bobina 6627, c) início bobina 6628, d) fim bobina 6628.
- Figura 58 – Distribuição da tensão ao longo do diâmetro dos tubos.
- Figura 59 – Comportamento da birrefringência acústica antes e após o alívio de tensão: a) início tubo 1, b) início tubo 2, c) fim tubo 2.
- Figura 60 – Diferenças das anisotropias medidas.
- Figura 61 – Distribuição da birrefringência: a) e b) início chapa 6628, c) e d) início chapa 6627.
- Figura 62 – Comparação do comportamento da birrefringência acústica entre chapa e tubo: a) bobina 6627, b) bobina 6628.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Características entre laminação controlada e convencional.
- Tabela 2 – Técnicas de análises de tensão.
- Tabela 3 – Caracterização do material.
- Tabela 4 – Equações das retas obtidas pelo ensaio de ultra-som com corpo-de-prova no sentido longitudinal ao sentido de laminação.
- Tabela 5 – Equações das retas obtidas pelo ensaio de ultra-som com corpo-de-prova no sentido longitudinal ao sentido de laminação.
- Tabela 6 – Resultados do coeficiente angular de cada bobina no início e fim da chapa nos sentidos longitudinais e transversais ao sentido de laminação.
- Tabela 7 – Desvio padrão entre início e fim de cada chapa nos sentidos longitudinais e transversais ao sentido de laminação.
- Tabela 8 – Resultado do teste de hipótese com intervalo de confiança de 95%.
- Tabela 9 – Médias de birrefringência de cada chapa.
- Tabela 10 – Diferença entre os tempos de percurso da onda ultra-sônica nas regiões das chapas.
- Tabela 11 – Análise de tensão ao longo das medidas do tubo.
- Tabela 12 – Erro padrão de medida de cada ponto nas chapas.
- Tabela 13 – Erro padrão de medida de cada ponto dos tubos.
- Tabela 14 – Erro padrão de medida de cada ponto dos tubos após alívio de tensões.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Com o crescimento do setor petrolífero no Brasil, principalmente após divulgação pela Petrobrás da descoberta de grandes reservas petrolíferas, tornou-se necessária a implantação de uma infra-estrutura segura e de custo acessível para transporte de óleo e gás.

O transporte por dutos se mostra como uma alternativa atraente por reduzir custos, diminuir o tráfego nas estradas e ferrovias e aumentar a segurança para o meio ambiente.

O Brasil conta hoje com extensa malha de dutos de transporte, com previsão de expansão, conforme observado na figura 1.

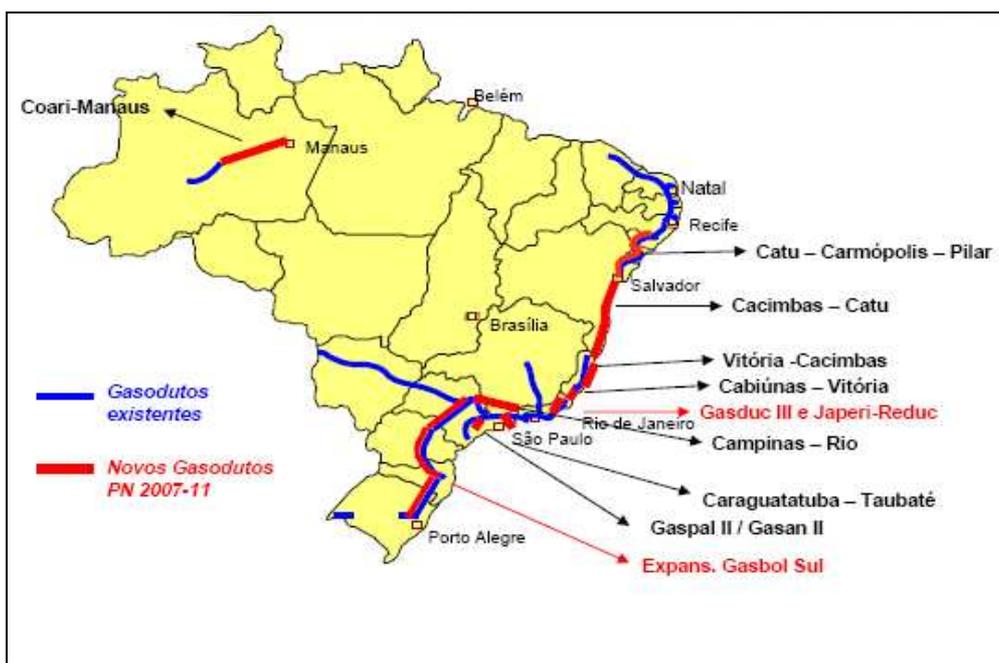


Figura 1 – Infra-estrutura necessária para o cenário de crescimento petrolífero [1].

A estrutura de dutos de transporte está sujeita a danos, fundamentalmente os decorrentes de movimentações de solo geologicamente instáveis; logo, o controle da integridade estrutural é fator de fundamental importância para o setor de transporte da indústria de petróleo.

Tubos de transporte são fabricados a partir de três processos distintos: ERW, UOE e processo sem solda. As etapas de conformação mecânica em chapas metálicas causam diferentes graus de anisotropia ao longo da seção circunferencial do tubo, outro fator que explica a anisotropia no material está no próprio processo de laminação para fabricação de chapas de aço.

A técnica ultra-sônica, apesar de ser sensível a variações microestruturais, mostra-se eficiente para medir as tensões residuais, tanto em campo quanto no processo de fabricação de tubos. Esta técnica baseia-se na diferença da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, quando esta atravessa um material tensionado; fenômeno este conhecido como acustoelasticidade.

1.2. Objetivo da pesquisa

O objetivo deste trabalho é verificar e comprovar a eficiência do método da birrefringência acústica no estudo de tensões em tubos condutores, feitos em aço API 5L X 70, utilizados na rede dutoviária, através da técnica ultra-sônica.

1.3. Escopo do trabalho

A dissertação é composta de 5 capítulos, apresentando inicialmente, neste capítulo de introdução, as considerações iniciais, os objetivos e o escopo do trabalho.

O capítulo 2 apresenta os materiais utilizados na fabricação dos tubos e os efeitos que alteram as propriedades mecânicas fundamentais requeridas nos aços. Apresenta, ainda, os processos convencionais de fabricação de tubos e o processo da *APOLO Tubulars* com a característica principal da soldagem por indução, além das técnicas de medição de tensão, principalmente a técnica ultra-sônica e sua aplicação.

O capítulo 3 apresenta os materiais de estudo, os equipamentos utilizados e a metodologia aplicada.

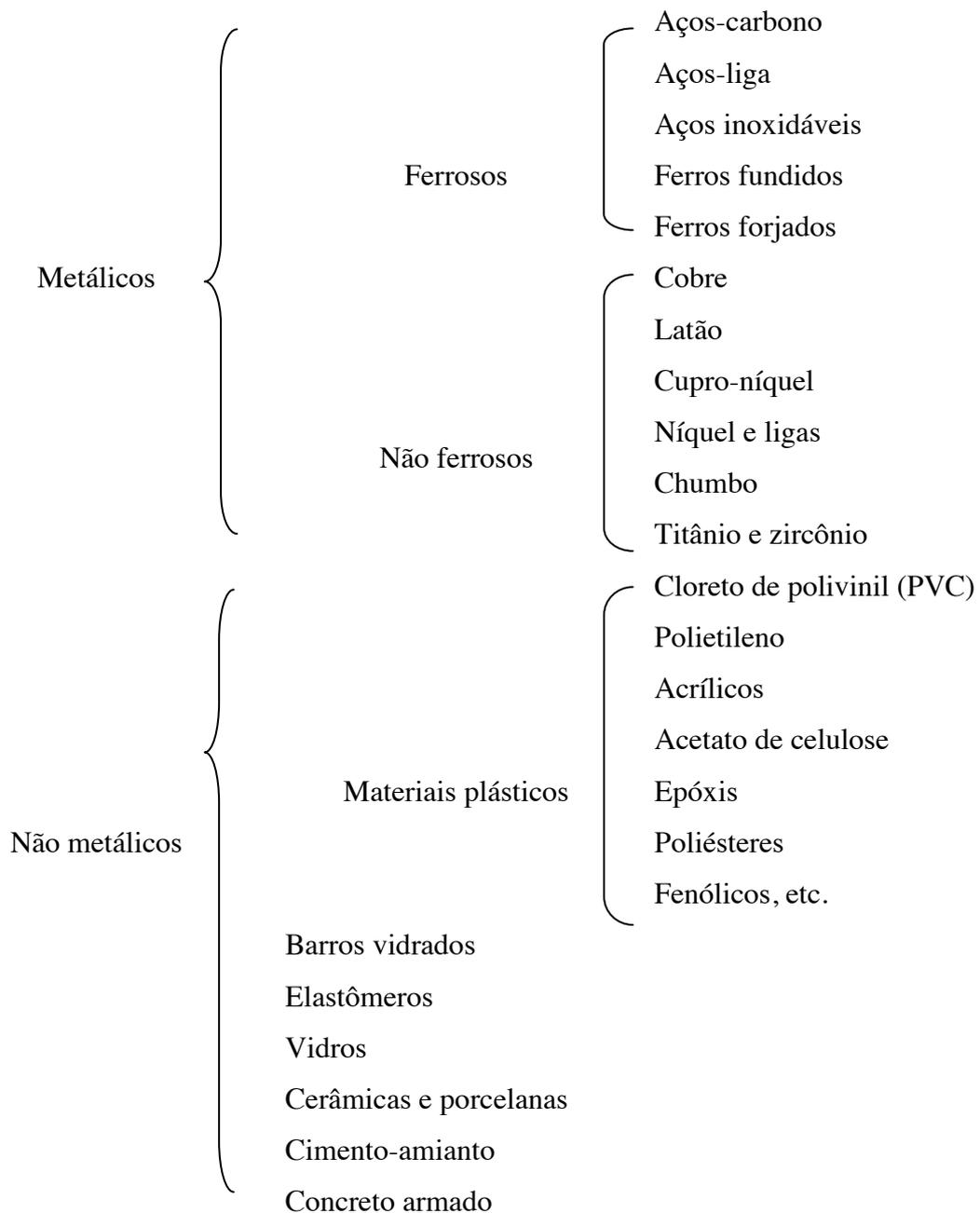
O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões dos ensaios realizados nas chapas e nos tubos utilizados no trabalho.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo e propostas para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais utilizados para tubos

Estruturas tubulares são cada vez mais empregadas com o objetivo de transportar diversos tipos de fluidos: águas, efluentes domésticos e industriais, petróleo e seus derivados, gás natural e GLP, minérios e carvão (em suspensão aquosa); dada a ampla utilização, torna-se necessária a diversificação dos materiais atualmente utilizados para a fabricação de tubos.



As propriedades mecânicas requeridas pelos tubos variam conforme as características específicas da aplicação: diâmetro do tubo, características do fluido a ser transportado (pH e abrasividade), condição de transporte, meio ambiente, custos de instalação, facilidade de reparo, entre outros [2].

2.1.1. Tubos para dutos

O primeiro tubo de ferro fundido utilizado em dutos foi em 1834, na cidade de Millville, New Jersey - EUA, representando um importante marco na indústria de gás. Entretanto, a possibilidade de transportar óleo através de dutos foi somente adquirida em 1863, quando Samuel Van Syckle utilizou dutos de ferro fundido em uma via de 8 km, a uma profundidade de 60 cm, para transportar óleo [3]. Desde então houve muitas inovações nos processos e fabricação e novos padrões de qualidade foram exigidos para chegar aos aços utilizados hoje.

Atualmente, os tubos utilizados no setor petrolífero trabalham em alta pressão, devendo ser resistentes aos efeitos danosos do meio, requerindo, para isso, um aço de alta resistência, além de boa soldabilidade e tenacidade. Os que melhor se enquadram pela relação custo x benefício são os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), que são aços microligados com baixo teor de carbono e elementos microligantes, como V, Ti, Cr e B, e processados termomecanicamente (laminação controlada) com refinamento de grãos.

Segundo Pereira [4], a classificação dos aços para utilização em tubos se dá pela microestrutura, já que suas propriedades mecânicas se baseiam neste princípio, sendo influenciado pelos elementos de liga e pelo processo de fabricação. Assim, classificam-se como: ferrita-perlita convencional; bainita-ferrita acicular; e multifase (ferrita poligonal e uma segunda fase que pode ser bainita e/ou martensita). Sage [5] fornece uma variação desta classificação, como pode ser visto na figura 2.

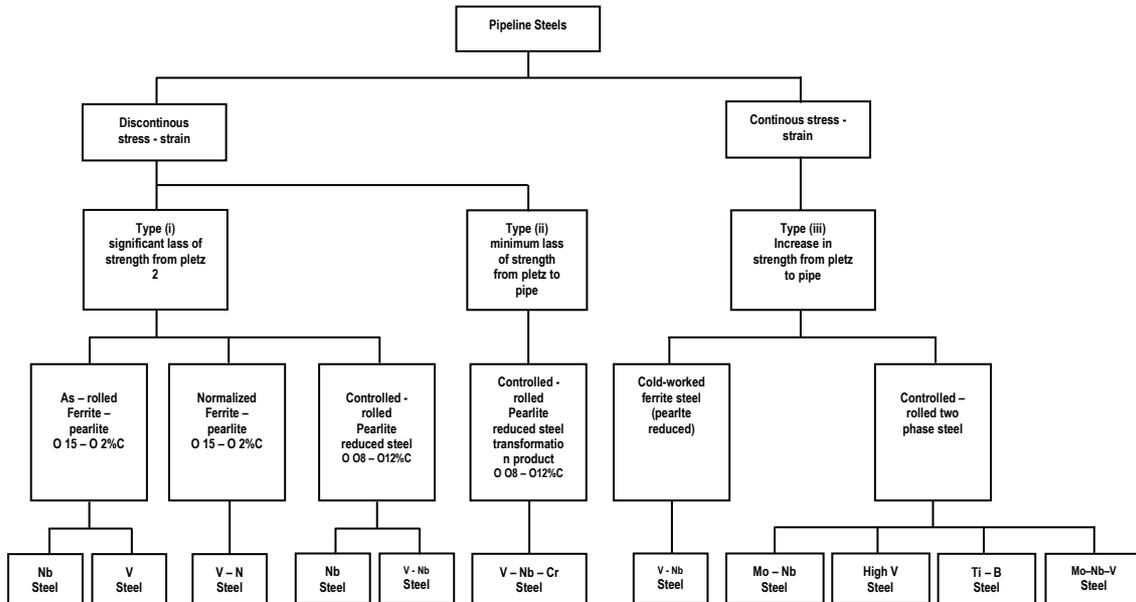


Figura 2 – Classificação dos aços utilizados em tubos, conforme SAGE [5].

2.1.1.1. Efeito dos elementos de liga nos aços

Para o material estudado, um aço baixo carbono microligado, deve-se compreender como são promovidos: alta resistência, boa tenacidade, soldabilidade, resistência a trincas induzidas por hidrogênio, resistência à fadiga nas juntas soldadas e resistência à corrosão, a fim de atender as exigências de tubos para oleodutos. Isso é possível através dos elementos de liga introduzidos na sua formação e das disposições em que elas se encontram no material.

O carbono é o elemento mais importante para o aumento da resistência, dado seu tamanho e por formar solução sólida intersticial na matriz. A maior parte dos aços microligados tem conteúdo de carbono variando de 0,30 a 0,50%, quantidade suficiente para formar perlita. A perlita diminui a ductilidade e tenacidade e aumenta a microsegregação durante a solidificação [6, 7, 8].

Os elementos nióbio, vanádio e titânio são responsáveis pela formação de carbonitretos precipitados, que é a outra forma de endurecimento nos aços microligados, pois impedem o crescimento do grão austenítico, formando os grãos finos. Todos aumentam a resistência e a dureza, além de permitirem a redução dos teores de carbono e manganês sem alterar a soldabilidade. O vanádio em quantidades de 0,05 a 0,15%, é o mais comum dos elementos microligantes [6,7].

O manganês é usado em quantias de 1,4 a 1,5%. Tem o efeito de reduzir a cementita, por formar sulfetos e carbonetos que difundem na ferrita, enquanto mantém o espaçamento interlamelar da perlita. Também auxilia no fortalecimento por solução sólida, realça a solubilidade de carbonitretos de vanádio e abaixa a temperatura de solubilidade para estas fases [6,7].

O silício é utilizado em altas porcentagens, de 0,30% a 0,70%, o que é associado com alta dureza, aparentemente devido ao aumento de ferrita, pois o silício auxilia na decomposição da cementita em ferrita, também degrada o alongamento e a condutividade térmica [6,7]. É também um bom desoxidante, permite obter menor teor de oxigênio em solução, mantendo a quantidade de óxido de ferro baixa.

O enxofre em altas porcentagens aumenta a usinabilidade dos aços microligados, pois formam sulfetos de manganês - um composto plástico [7].

O alumínio é importante no controle do tamanho de grão austenítico em aços, através da formação de inclusões metálicas de nitreto de alumínio, que se colocam nos contornos de grão e inibem o crescimento do grão austenítico. O nitrogênio é o maior elemento intersticial do carbonitreto de vanádio. Por esta razão, necessita-se de maiores teores de nitrogênio para fortalecimento efetivo dos precipitados, porém diminui a tenacidade e pode causar corrosão intergranular quando em solução [6,7].

2.1.1.2. Efeito do refino de grão no material

Segundo Gorni [9], para se obter boas propriedades mecânicas em aços de baixo carbono, além do controle da composição química, é necessário controlar o tamanho de grão, através do refino de grão, precipitação de segunda fase, transformação de fase, formação de textura com solução sólida e encruamento.

Várias técnicas são possíveis durante o processamento a quente do aço, como o TMCP (Thermomechanical Control Processing) e laminação controlada, sendo esta, a mais utilizada pela relação custo x benefício [10].

O TMCP é um processo combinado de laminação controlada e resfriamento acelerado, sendo muito eficiente para o refino de aços de graus X80 a X120. Este processo se baseia no controle da temperatura de solubilidade dos carbonetos de nitrogênio, tempo de permanência na temperatura e o crescimento do grão

austenítico. O resfriamento acelerado para transformação da austenita em ferrita é feito ao ar à temperatura de austenitização da liga [8].

A laminação controlada já é estabelecida e consolidada no Brasil para os graus inferiores, como o X45. Como toda técnica de processo termomecânico, as características são: a temperatura de aquecimento, o tempo de encharque e a taxa de resfriamento, porém com a vantagem de promover excelente dureza com relação ao método tradicional, como pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1 – Características entre laminação controlada e convencional. [13]

Practice	Rolling process					Mechanical properties
	Slab (as-cast)	Slab heating	In recrystallizing region	In non-recrystallizing region	Microstructure	
New	contains fine TiN precipitates (not larger than 0.02 μm) and a solid solution of TiN TiN not larger than 0.02 μm	fine TiN precipitates and low temperature heating refine γ grains during heating ASTM micrograin size Nos. 5-9 (when heated at 1150°C)	produces uniform and fine γ grains; fine TiN precipitates refine the recrystallized γ grains	produces uniform elongated γ grains with deformation bands	produces uniform and fine ferrite grains	excellent toughness in base metal and HAZ
Conventional						relatively good toughness in base metal with poor HAZ toughness

Este processamento controlado utiliza altas temperaturas dentro do campo de não recristalização dos grãos austeníticos. O processo é dividido em 3 etapas, conforme se verifica na figura 3: (I) Região de recristalização, (II) Região de não recristalização e (III) laminação na região de segunda fase.

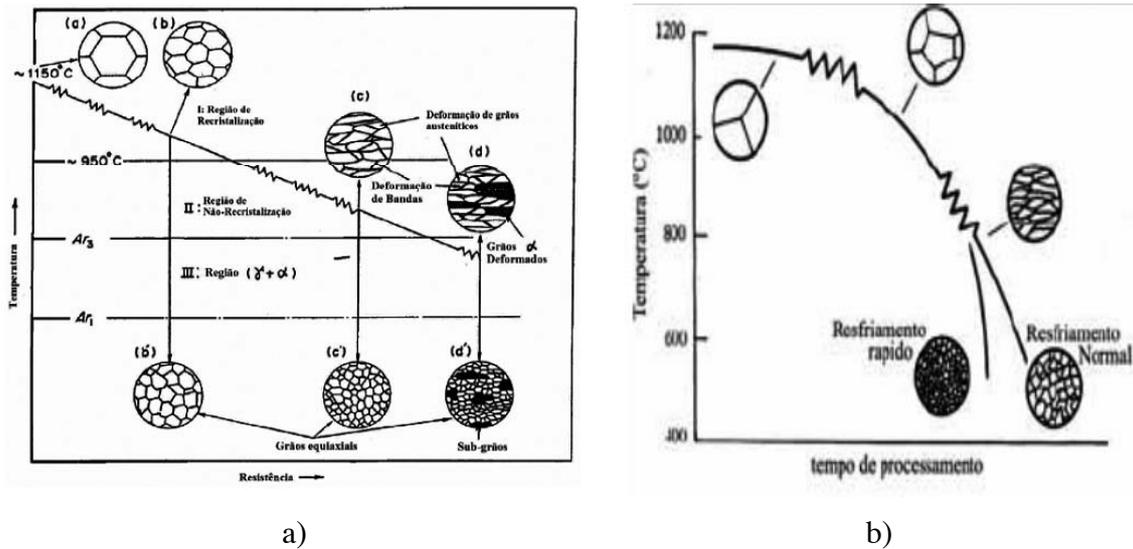


Figura 3 – Variações estruturais na laminação controlada: a) os efeitos da temperatura na resistência da estrutura [12], b) as diferenças da estrutura com o tempo de processamento [13].

Na região de recristalização ocorre a deformação do grão austenítico através de ciclos de deformação. Ao entrar na região de não recristalização os contornos de grão austeníticos crescem junto com a taxa de nucleação da ferrita. Além disso, formam-se diversas bandas de deformação e recozimentos que atuam como sítios de nucleação da ferrita. A laminação na região de segunda fase, abaixo da temperatura Ar_3 promove o achatamento dos grãos austeníticos não transformados, deformando os grãos de ferrita e promovendo o aparecimento dos subgrãos de ferrita. Estes subgrãos possuem alta densidade de discordâncias aumentando a resistência e tenacidade obtendo uma estrutura ferrita-perlita [11].

2.1.2. Aços API 5L

Os aços API, com características de elevada resistência, aliada a boa soldabilidade, baixo nível de inclusões e boa qualidade superficial, são especificados pela American Petroleum Institute (API), no caso a API 5L [14]. Ele definiu uma série de normas com o objetivo de estabelecer padrões para a utilização de tubos apropriados para carregar gás, óleo e água, que é a norma API 5L (2000), aplicada nesta pesquisa.

Esta especificação abrange tubos de aço, com e sem solda, desde o processo de laminação da chapa, até a soldagem e os testes de inspeção; também com o objetivo de especificar os padrões requeridos no devido fim.

De acordo com as exigências dos tubos, os aços API 5L A e B são usadas em tubulações de baixa pressão, enquanto que os graus API 5L X42, X46, X52, X60 e X70 são utilizadas em tubulações de alta pressão.

Na norma API 5L versão 2000 descreve sobre os graus, de A25 a X80, e especifica seu diâmetro, carbono equivalente, elementos de liga, limite de escoamento mínimo, dentre outros parâmetros, para a utilização apropriada.

De acordo com a norma ANSI.B.31, os tubos desta especificação não devem ser empregados para temperaturas acima de 200°C, e a norma ANSI.B.31.1 (tubulações para vapor), proíbe o uso desses tubos para vapor [15].

As normas mais atuais contêm os graus maiores como o X120 que são aços ARBL (alta resistência e baixa liga), mais utilizados para prospecção de gás e óleo.

2.2. Processos de fabricação de tubos

O processo de fabricação de tubos no Brasil é diversificado, em decorrência da sua grande gama de utilização, de fabricantes e de tecnologia, como observado na figura 4.

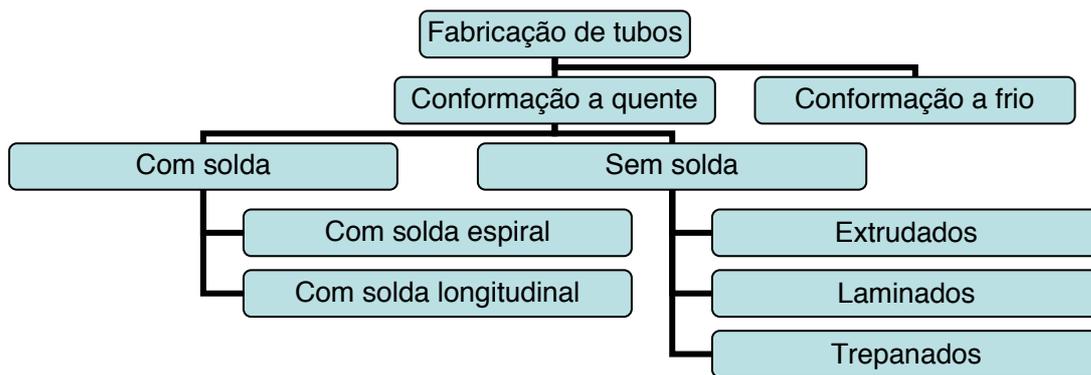


Figura 4 – Processos de fabricação de tubos.

Nos processos de fabricação de tubos sem solda, geralmente utilizam-se tarugos ou barras circulares, os quais são aquecidos e colocados entre cilindros, inclinados entre si no plano horizontal e com movimento de rotação no mesmo sentido ou numa matriz

de extrusão. O material adquire um movimento helicoidal que o movimenta para frente, de encontro ao mandril, que conforma o diâmetro interno do tubo. Obtém-se um tubo bruto, o qual sofrerá conformação de acabamento através de laminadores perfiladores. Este processo de fabricação provoca rugosidade na parte interna do tubo [16].

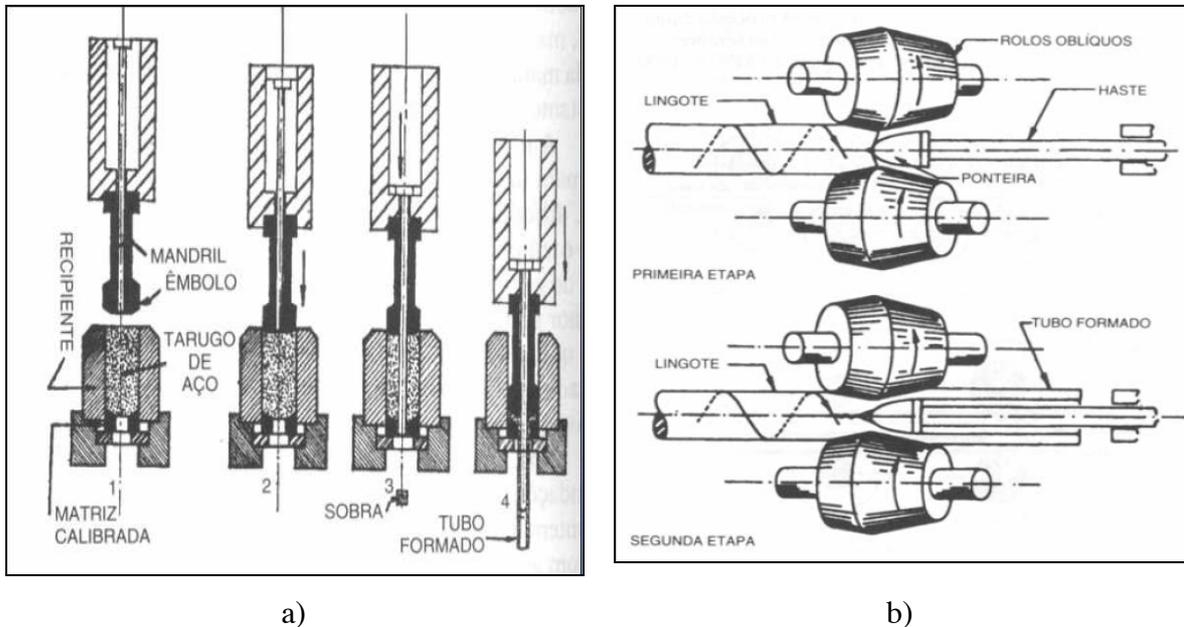


Figura 5 – Processo de conformação a quente sem solda: a) por extrusão, b) por laminação (Processo Mannesmann) [2].

Estes processos apresentam maior homogeneidade e isotropia no sentido circunferencial. São resistentes à pressão interna e a torção, porém as peças do maquinário são os fatores essenciais para o bom acabamento do tubo.

Para fabricação de tubos com solda existem 2 processos distintos, o UOE e o ERW.

O processo UOE é conhecido pelas etapas de dobramento das chapas em formas de “U” e “O” até a formação do tubo. Este processo é responsável por grande parte dos tubos. Os tubos não passam por qualquer tratamento de alívio de tensões. As etapas deste processo são prensamento da borda e da chapa, soldagem automática por arco submerso e expansão mecânica a frio [16 e 18].

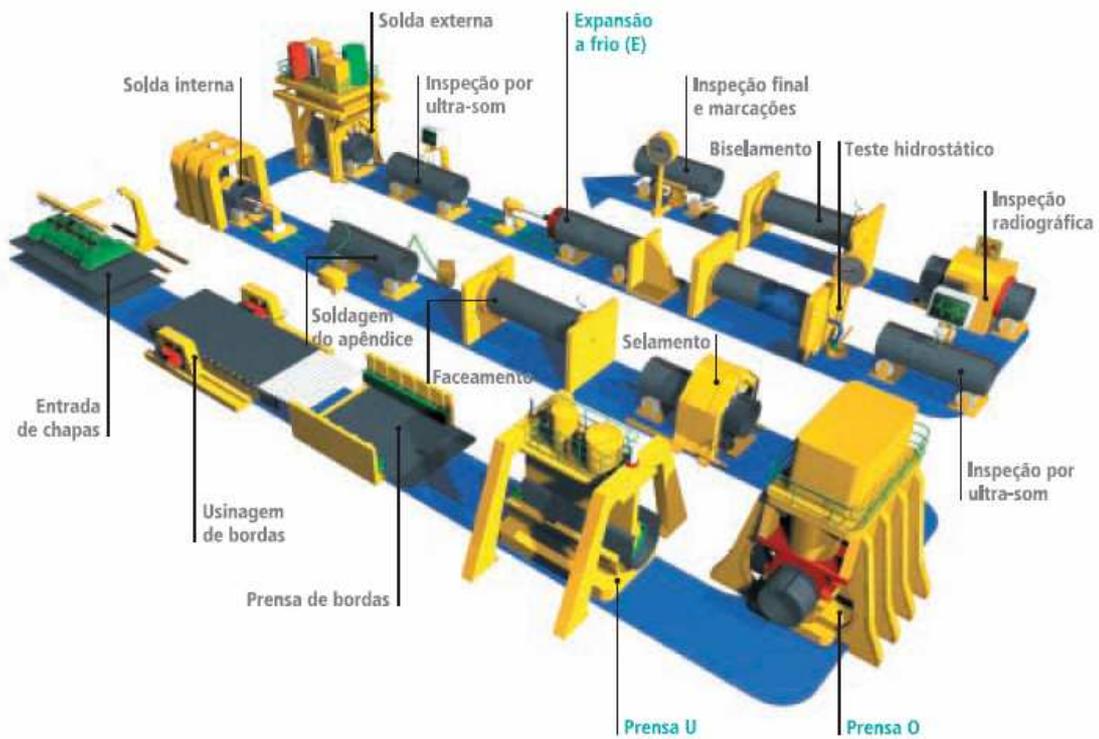


Figura 6 – Esquema do processo UOE [18].

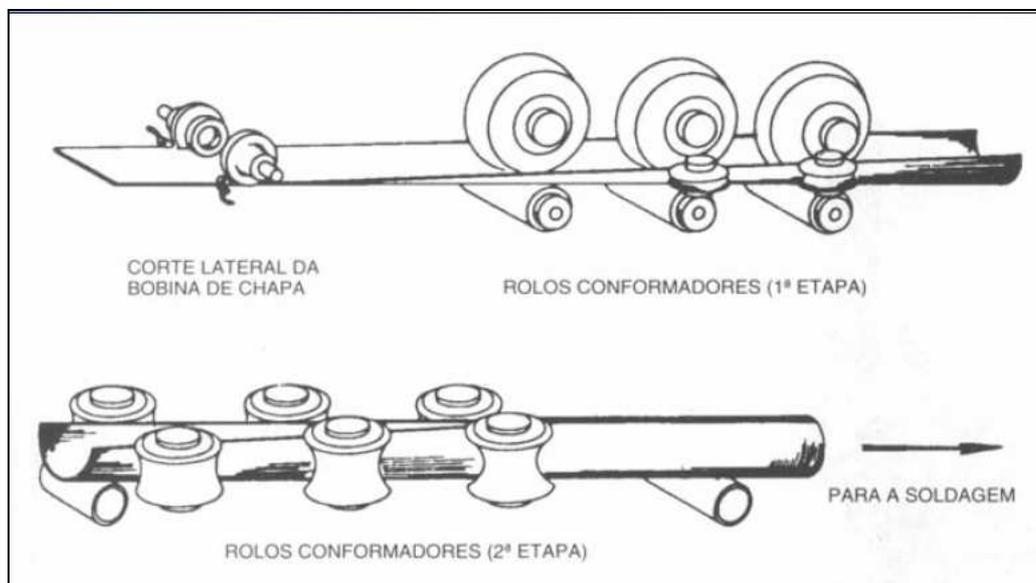


Figura 7 – Processo de conformação a quente com solda longitudinal [2].

O processo ERW (Weld Resistance Electric - solda por resistência elétrica) é utilizado na fabricação de tubos com solda longitudinal ou espiral. Este processo garante a homogeneidade da matéria-prima com a solda e confere excelentes

características aos produtos. São geralmente fabricados a partir de bobinas de aço carbono laminadas a quente e conformadas a frio por meio de rolos, soldadas por resistência elétrica e passam por um tratamento térmico de normalização no cordão de solda para alívio de tensões residuais [16]. Geralmente no processo ERW, utiliza corrente elétrica de baixa frequência, transmitida por contato através de rodas de cobre, uma em cada borda do tubo, com velocidades dificilmente superiores a um dígito de metro por minuto; porém, existem algumas variações como o HFCW – “high frequency contact welding” – com o desenvolvimento dos geradores de alta frequência, as rodas de contato foram substituídas por contatos deslizantes e as velocidades atingiram dezenas de metros por minuto; HFIW – “high frequency induction welding” quando da eliminação dos contatos, substituídas por bobinas de indução, atingindo velocidades de centenas de metros por minuto [18]. Os tubos usados nesta pesquisa foram fabricados por este processo na *Apolo Tubulars*. A figura 8 mostra os passes da conformação do processo.

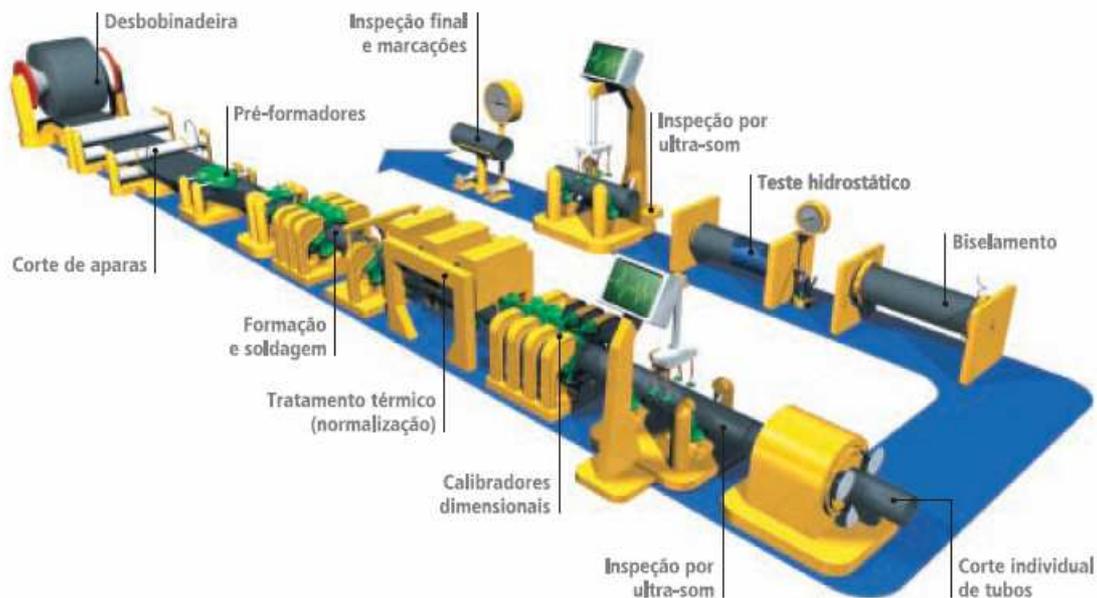


Figura 8 – Processo de fabricação ERW [18].

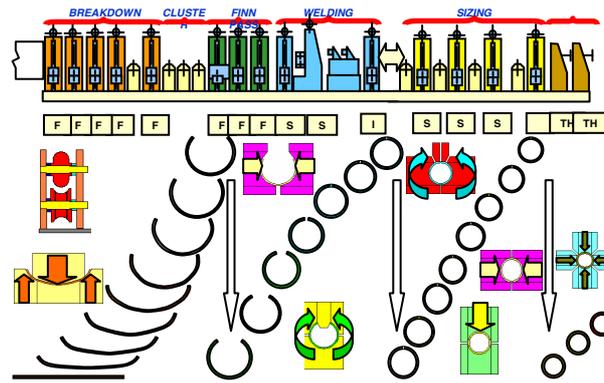


Figura 9 – Confeção de bordas [19].

O processo SAW (Submerge Arc Weld) é uma variação do processo ERW, onde também utiliza a solda por resistência elétrica – arco submerso; porém, durante a formação dos tubos a chapa ganha movimento vertical e horizontal, formando assim a solda na forma helicoidal [18].

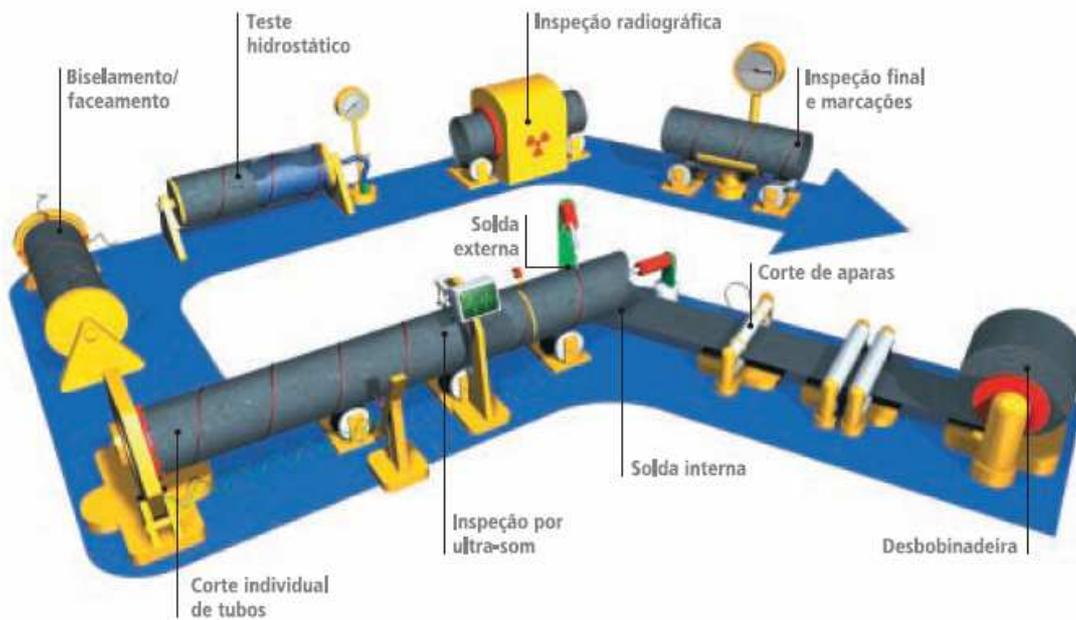


Figura 10 – Esquema de fabricação SAW helicoidal [18].

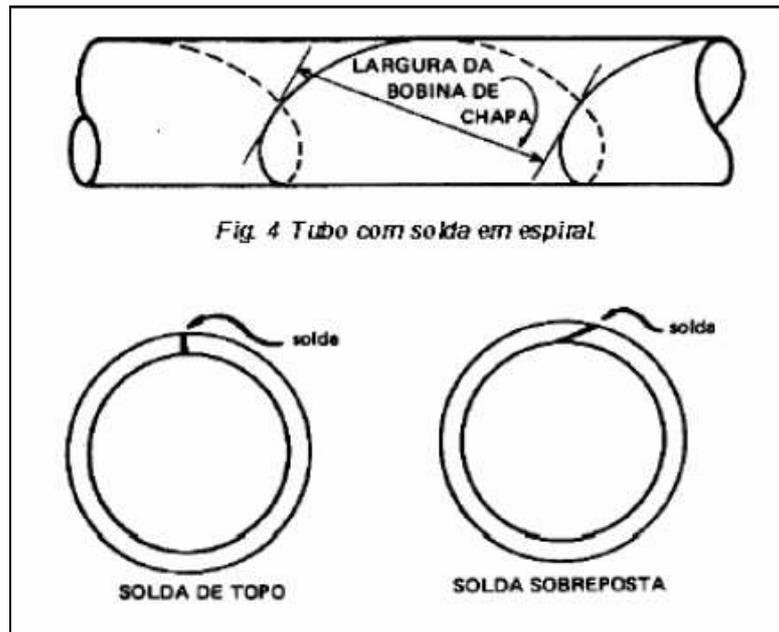


Figura 11 – Processo de conformação a quente com solda espiral [2].

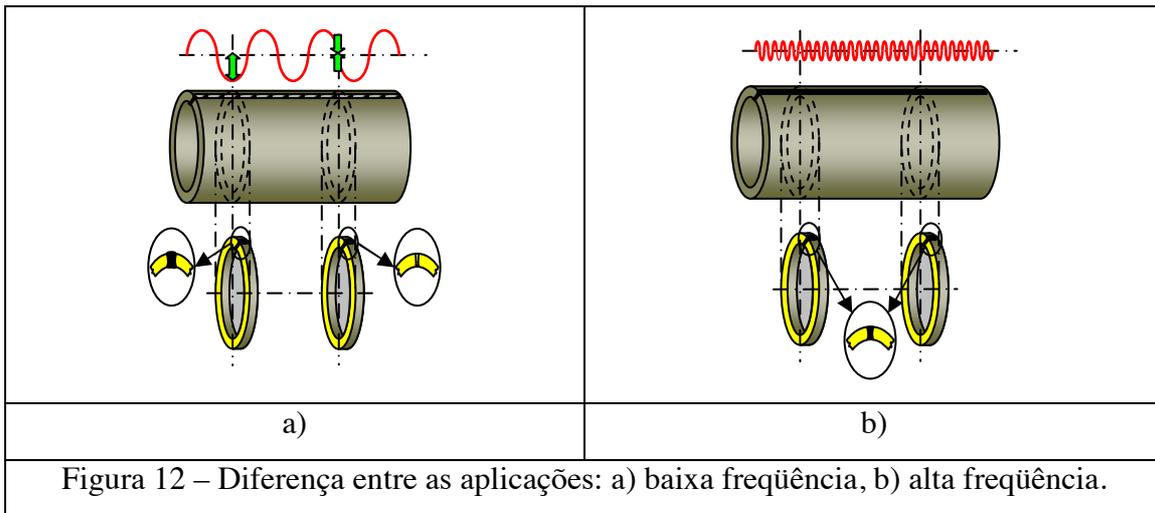
Os processos com solda, de forma geral, apresentam anisotropia acústica, maior tensão e deformações no sentido transversal, que no sentido longitudinal, por decorrência de sua conformação. Por isso, a qualidade é ligeiramente inferior, mas é amplamente utilizado no mundo inteiro.

2.3. Soldagem por indução

O principal guia para a soldagem de tubulações é a norma API 1104 [20], a qual fornece dados necessários à obtenção de juntas soldadas com boas qualidades. Vários estudos tem sido feitos para melhorar as técnicas hoje utilizadas. Geralmente com o eletrodo revestido, as juntas são soldadas no campo, em diversas posições e somente do lado externo, o tipo de eletrodo revestido geralmente utilizado na soldagem de tubulações é o AWS EXX10, pois possui elevada penetração. Já com o arame tubular, apresenta baixa susceptibilidade à falta de fusão, aumentando a produtividade com a escolha certa do arame. Segundo Ventrella [25], na soldagem do aço API 5L X70 com o arame tubular AWS E81T1-Ni1, a taxa de resfriamento do metal de solda é um fator determinante da microestrutura resultante; não devendo ser realizada com a combinação metal de base a temperatura elevada e tensão alta. A técnica de soldagem por indução, visto com maior ênfase neste estudo, é cada vez mais utilizada pela sua alta performance e versatilidade, permitindo uma ZTA (zona

termicamente afetada) pequena e, conseqüentemente, um menor índice de trincas por corrosão.

Inicialmente, eram utilizadas ondas quadradas de baixas frequências (50 a 150 Hz) para aquecer as bordas dos tubos soldados. Em função destas, era possível identificar variações na zona termicamente afetada pela solda, função do grande comprimento de onda empregado (~ 5 mm). Hoje se empregam frequências de até 500.000 Hz, cujo comprimento de onda se mede em microns (~ 0,001 mm). A diferenças entre esses comprimentos de onda e sua aplicação pode ser visto na figura 12.



O processo de solda de tubos, por indução em alta frequência, consiste em passar uma corrente alternada de alta frequência por meio do material, com limitação ao trecho requerido, através de ímãs cilíndricos - para evitar a perda de energia - gerando um campo magnético na superfície da bobina, induzindo assim um fluxo de corrente nas proximidades da face, que pela própria resistência do material, aquece, concentrando o calor gerado na borda do tubo a ser unido, pela ação dos rolos de solda, conforme figura 13 [21, 22].

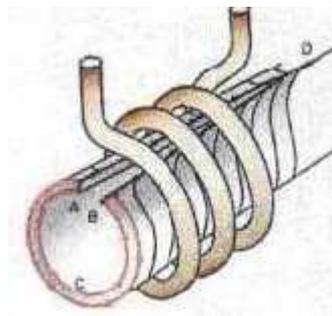


Figura 13 – Soldagem por indução em tubo [17].

Na área próxima às extremidades da bobina conformada, o fluxo de corrente circula pela parte interna do tubo e nas bordas a serem soldadas. Seguindo a lei de menor esforço, a face que oferece menor impedância é a interna, por onde passa maior fluxo de corrente, aquecendo a face interna e desperdiçando energia. Por esta razão se torna necessário promover a redução do caminho das extremidades a serem soldadas, através de materiais magnéticos, na proximidade da face a ser soldada.

A utilização deste tipo de corrente gera menor voltagem e mantém a potência requerida, com a vantagem de controlar o processo permanentemente, reduzindo peso de equipamento, proporcionando uma solda de alta qualidade, com baixa penetração na espessura da bobina. Para os aços de alta resistência é a melhor opção, pois os métodos convencionais são mais perigosos e menos performáticos.

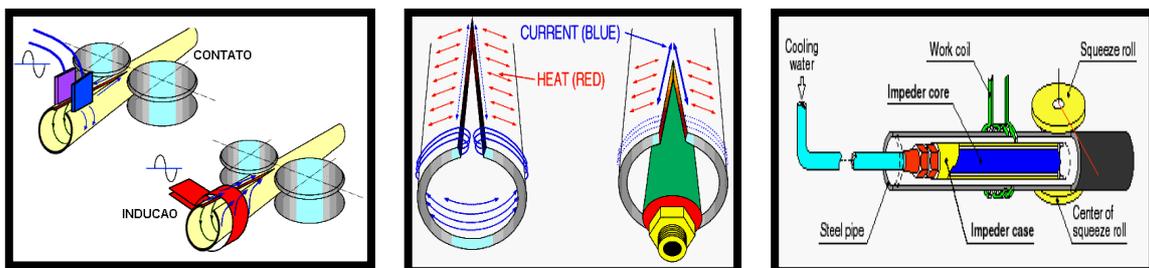


Figura 14 – Demonstração do processo de soldagem por indução [19].

As transformações ocorridas na ZTA por este processo são extremamente rápidas, considerando as variáveis que influenciam, tais como: tempo, gradiente de temperatura, deformação mecânica, características químicas da peça, morfologias metalúrgicas, mecanismos de difusão dos elementos químicos envolvidos, impurezas e segregações, entre outras [19]. Logo, pode-se dividir o processo em 3 etapas, aquecimento, deformação e resfriamento.

A figura 15 mostra a evolução do aquecimento ao longo do “V” das bordas. Onde na figura A, observa-se o início da passagem de corrente, e aquecimento das bordas, na figura B, o aquecimento atinge toda a borda, na figura C as bordas já aquecidas entram em contato, na figura D mostra as isotermas do ponto se dissipando e culminando na figura E, onde perde calor por condução (ao longo do material), convecção (nas bordas com o ar) e por radiação, gerando a clássica ZTA. Velocidades de resfriamento

determinam a qualidade da estrutura final obtida, sendo um fator de controle do processo [19].

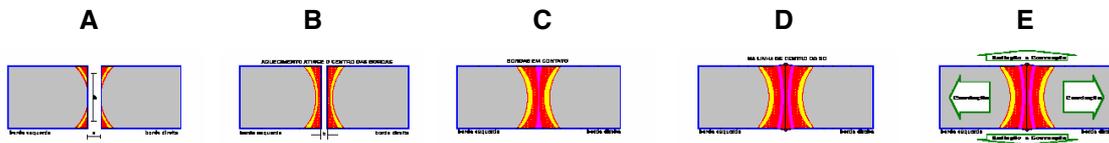


Figura 15 – Sequência do processo de soldagem [19].

À medida que o material aquece, ocorre a dilatação do mesmo e no momento C, quando há o contato, a pressão entre as bordas a deforma mecanicamente, causando, desta forma, a cabeça da solda.

2.4. Análises de tensões

Tensões residuais são muito importantes, pois definem seu comportamento perante a fadiga, fratura, corrosão, entre outros fatores, além do seu efeito no componente metálico.

A análise de tensões em componentes em uso é de fundamental importância, devido ao efeito conjunto das tensões residuais, com as tensões aplicadas, podendo ocasionar a fratura dos mesmos.

2.4.1. Tensões residuais

As tensões residuais são aquelas que permanecem no material, mesmo quando todo o carregamento externo é retirado. Essas tensões aparecem quando o material é submetido a processos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, trefilação, usinagem e outros), que causam deformações plásticas não uniformes ao longo da seção da peça. Em sistemas compostos por vários componentes, as tensões também podem resultar de forças de reação quando o material é colocado em posição, ou seja, quando não há carregamento externo e transformações estruturais do material, com expansões e contrações, que causam tensões residuais [27] As tensões que serão estudadas são originárias do processo de conformação a frio da chapa de aço e do processo de soldagem.

Durante o processo de soldagem há o aquecimento do material, onde suas dimensões se dilatam proporcionalmente à temperatura. Como a variação de temperatura não é uniforme pela peça e não existe liberdade de expansão e contração do material durante o ciclo térmico da confecção do tubo, então, se desenvolvem tensões residuais.

Há três classificações de tensões residuais: macroscópicas, que ocorrem em alta escala na natureza; microtensões estruturais, que ocorrem entre diferentes fases e partículas na estruturas; e tensões interatômicas, devido a distâncias atômicas dentro do grão [23].

Os sistemas de tensões residuais é auto equilibrado. A força e o momento dessas tensões são nulos. O aparecimento dessas tensões pode gerar diversos problemas como formações de trincas, tendência à estrutura frágil e instabilidade dimensional.

As tensões residuais podem afetar as propriedades mecânicas do material e sua estrutura causando falhas estruturais, diminuindo o comportamento de corrosão (no caso de tensões residuais elásticas), mas podem ter efeitos benéficos como o aumento do limite de fadiga, no caso de tensões superficiais compressivas [23].

2.4.2. Técnicas de medição de tensões

Existem diversas técnicas qualitativas e quantitativas para analisar tensões residuais, principalmente em solda, conforme tabela 2. Geralmente podem ser distinguidas entre destrutivas e não destrutivas.

Tabela 2 – Técnicas de análise de tensão.

Grupo	Técnica
Técnicas de relaxamento de tensão	Técnica de extensômetro elétrico
	Técnica de extensômetro mecânico
	Técnica de revestimento frágil
	Técnica de revestimento fotoelástico
Técnica de difração de raios-X	Difração em filme
	Difração com difratômetro
Técnicas baseadas em propriedades sensíveis à tensão	Técnica com ultra-som
	Técnica com medida de dureza
	Técnica magnética

Técnica de fissuração	Fissuração pelo hidrogênio
	Fissuração por corrosão sob tensão

As séries destrutivas se baseiam na destruição do estado de equilíbrio da tensão residual, no componente mecânico. Neste sentido, pode-se medir o relaxamento, ou melhor, as conseqüências do relaxamento.

As técnicas de relaxamento de tensão são baseadas na deformação elástica que ocorre quando uma parte de um corpo-de-prova, contendo tensões residuais, é removida [27]. Esta mudança na deformação elástica pode ser medida por sensores elétricos ou mecânicos, chamados extensômetros ou strain gages. Com a associação de equações de elasticidade calculam-se as tensões residuais existentes anteriormente no material. Embora esta técnica seja destrutiva é a mais utilizada.

Todos os métodos destrutivos são sensíveis à tensão residual macroscópica.

Os métodos não destrutivos se baseiam na relação entre os parâmetros físicos, ou cristalográficos, ou à tensão residual. Em sua maioria, os materiais são sensíveis aos três tipos de tensões, porém não podem diferenciá-los.

As técnicas de difração de raios-X são baseadas nos parâmetros cristalinos de pequenas regiões da peça e na variação destes parâmetros com as deformações elásticas, presentes no material submetido a tensões residuais; permite medir tensões residuais e não é destrutiva, porém é menos precisa e mais demorada.

Técnicas baseadas em propriedades sensíveis a tensão são técnicas não destrutivas e também medem as alterações associadas às deformações elásticas presentes na região medida. A técnica ultra-sônica se baseia na alteração do ângulo de polarização da onda ultra-sônica polarizada, relacionando-o a tensão residual. A análise de dureza é baseada em pequenas alterações que ocorrem nas regiões que contém deformações elásticas e o método magnético se baseia nas alterações das propriedades magnéticas em materiais ferromagnéticos.

A técnica de fissuração é baseada na avaliação qualitativa do padrão de fissuração, desenvolvido em corpos-de-prova em ambientes agressivos, capazes de formar trincas por tensões. Essas trincas são induzidas por fragilização de hidrogênio ou por corrosão sob tensão.

2.4.3. Ultra-som

De uma forma geral, a técnica de ultra-som consiste em uma vibração ou onda ultra-sônica, acima de 20 kHz, que ao percorrer um meio elástico, refletirá ao incidir num anteparo qualquer, seja uma descontinuidade, uma falha interna ou o fim da peça. Através de aparelhos especiais, detectamos as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando os picos.

Este método não destrutivo tem por vantagem alta sensibilidade na detecção de defeitos internos, por ser um método volumétrico, é eficaz também nas medidas de espessuras e tensões residuais na peça. Para cada finalidade há algumas características específicas importantes.

2.4.3.1. Tipos de ondas

O teste ultra-sônico de materiais é feito com o uso de ondas mecânicas ou acústicas colocadas no meio em inspeção. A passagem de energia acústica no meio faz com que as partículas que compõem o mesmo, execute o movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuído com o tempo em decorrência da perda de energia adquirida pela onda. Se assumirmos que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem são rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção, então podemos classificar as ondas acústicas em três tipos principais:

Ondas longitudinais ou ondas de compressão - São ondas cujas partículas oscilam na direção de propagação da onda, podendo ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases.

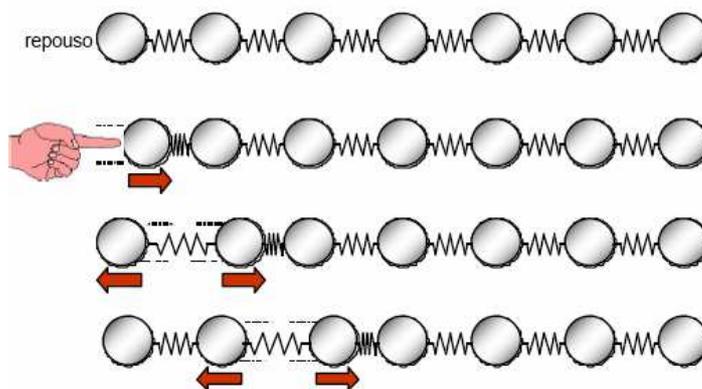


Figura 16 – Onda longitudinal [24].

A figura 16 mostra como o primeiro plano de partículas vibra e transfere sua energia cinética para os próximos planos que passam a oscilar. Desta maneira, todo o meio elástico vibra na mesma direção de propagação da onda (longitudinal), e aparecerão “zonas de compressão” e “zonas diluídas”. As distâncias entre duas zonas de compressão determinam o comprimento de onda [24].

Em decorrência do processo de propagação, este tipo de onda possui uma alta velocidade de propagação como característica do meio.

Ondas transversais ou ondas de cisalhamento – é a onda utilizada no presente estudo para detecção de tensões residuais e espessuras, é definida, quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação. Neste caso, se observa que os planos de partículas se mantêm na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente.

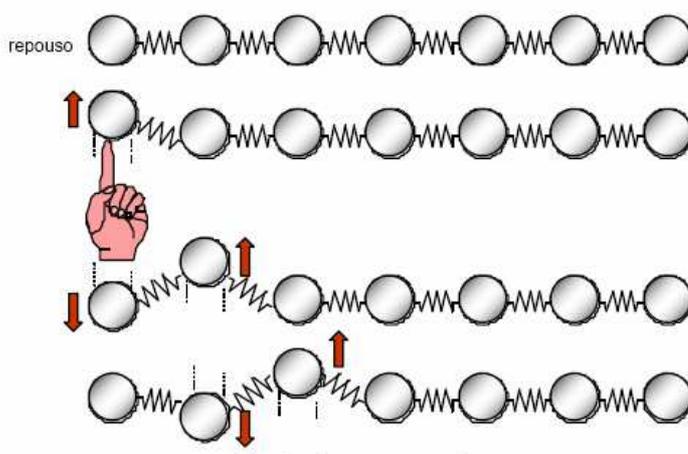


Figura 17 – Onda transversal [24].

As partículas oscilam na direção transversal à direção de propagação, podendo ser transmitida somente a sólidos. As ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem nos líquidos e gases, pelas características das ligações entre as partículas, conforme figura 17. Neste caso o comprimento de onda é à distância entre dois “vales” ou dois “picos” [24].

Ondas superficiais ou ondas de Rayleigh - São assim chamadas pela característica de se propagarem na superfície dos sólidos. Devido ao complexo movimento oscilatório

das partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial, entre duas fases diferentes, é aproximadamente 10% inferior que a de uma onda transversal.

O tipo de onda superficial que não possui a componente normal e se propaga em movimento paralelo à superfície e transversal em relação à direção de propagação, recebe a denominação de onda de “Love”. Sua aplicação se restringe ao exame de finas camadas de material que recobrem outros materiais [24].

Para ondas superficiais que se propagam com comprimento de onda próxima a espessura da chapa ensaiada, a inspeção não se restringe somente à superfície, mas em todo o material. Para esta particularidade denominamos as ondas de “Lamb”.

As ondas de “Lamb” podem ser geradas a partir das ondas longitudinais incidindo segundo um ângulo de inclinação em relação à chapa.

O ensaio ultra-sônico de materiais com ondas superficiais são aplicados com severas restrições, pois somente são observados defeitos de superfície e, nestes casos, existem processos mais simples para a detecção destes tipos de discontinuidades [24].

2.4.3.2. Geração de ondas

Existem 2 sistemas para geração de onda ultra-sônica: os eletromagnéticos (EMAT) e os piezelétricos (PZT). Os transdutores são responsáveis por gerar ou transmitir ao material estudado, as ondas ultra-sônicas. Os mais utilizados são os que contêm cristais piezelétricos, que com o auxílio do acoplante (material utilizado para melhorar a passagem da onda entre o transdutor e a peça, reduzindo a camada de ar existente entre as mesmas), conseguem converter a energia elétrica em oscilação mecânica dentro do material. A vantagem deste sistema é o baixo custo e maior relação entre sinal e ruído.

Os transdutores eletromagnéticos têm aplicação nas áreas ferroviária e estrutural. A vantagem deste sistema é que não precisa de fluido de acoplamento acústico, são menos susceptíveis a variação de temperatura e a variação de umidade, eliminando também o efeito da pressão entre sensor e peça.

Tal fenômeno é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezelétrico com tensão elétrica alternada, de maneira que o mesmo se contrai e se estende ciclicamente. Se tentarmos impedir esse movimento, a placa transmite esforços de compressão às zonas adjacentes, emitindo uma onda longitudinal, por exemplo, cuja forma depende da frequência de excitação e das dimensões do cristal [24].

Existem 4 tipos de transdutores piezelétricos: normal, angular, duplo cristal e phased array. O transdutor normal é responsável pela onda longitudinal. O transdutor angular é um normal, porém incide com um determinado ângulo. O transdutor duplo cristal é utilizado para detectar defeitos sub-superficiais e em chapas de pequena espessura, pois separa a emissão da recepção. Transdutores Phased array são compostos por dezenas de pequenos cristais (10 a 256), ligados a circuitos independentes, controlando independentemente o tempo de excitação, mudando o feixe sônico; isto permite detectar vários ângulos de refração ao mesmo tempo, aumentando a velocidade de inspeção [23].

Transdutores piezelétricos são altamente eficientes, mas para medir tensão eles reduzem o grau de certeza devido à precisão da velocidade requerida. Para resolver este problema uma das alternativas é a utilização de transdutores eletromagnéticos acústicos, pois eles detectam a onda ultra-sônica diretamente da interação eletromagnética e não precisam de acoplantes [23].

2.4.3.3. Propagação de ondas acústicas

A onda ao percorrer um material qualquer sofre, em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia.

A dispersão deve-se ao fato da matéria não ser totalmente homogênea, contendo interfaces naturais de sua própria estrutura ou do processo de fabricação, por exemplo, ferro fundido com grãos de ferrita e grafita possui propriedades elásticas distintas. A mudança das características elásticas, num mesmo material, é denominada anisotropia, que é bem significativa quando o tamanho de grão for 1/10 do comprimento de onda utilizada.

O fenômeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. A energia é cedida pela onda para que cada partícula do meio execute um movimento de oscilação, transmitindo a vibração às outras partículas do próprio meio.

O resultado dos efeitos de dispersão e absorção, quando somados, resultam na atenuação sônica. Este fenômeno pode ser observado na tela do aparelho de ultra-som, onde a altura dos ecos diminui com a distância percorrida pela onda.

O fenômeno de divergência do feixe é percebido pela perda da intensidade da onda quando se afasta da fonte emissora da vibração.

A propagação da onda está bastante relacionada com o campo piezelétrico do transdutor, que é formado por infinitos pontos oscilantes, onde cada ponto produz ondas que se propagam no meio, conforme demonstrado na figura 18.

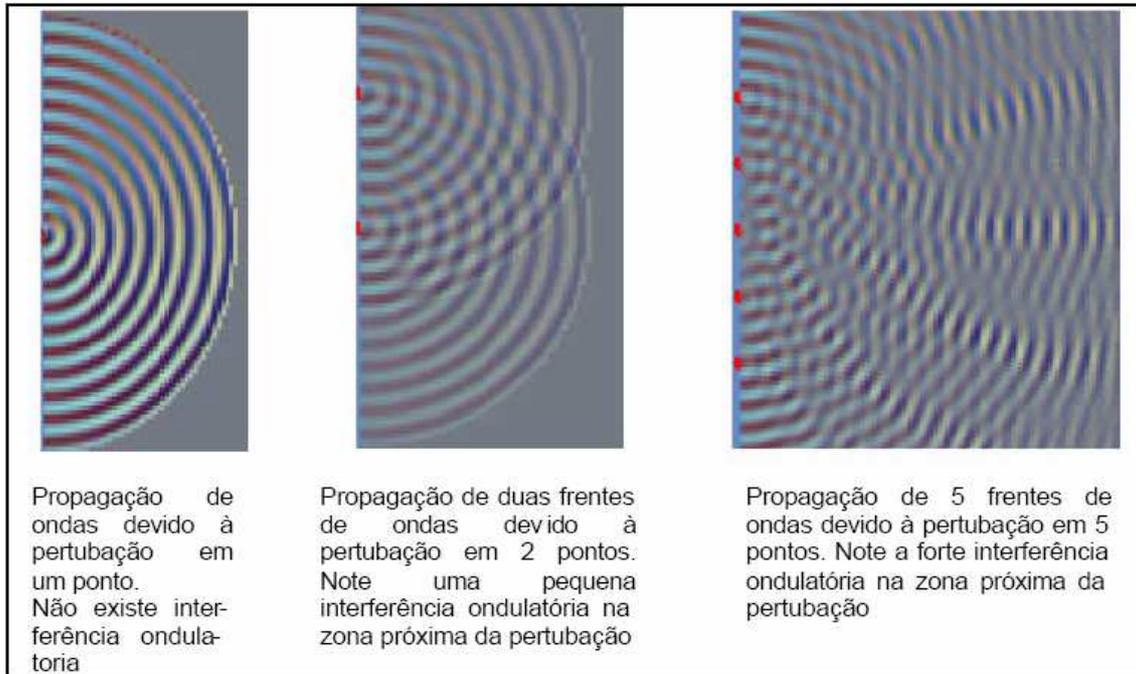


Figura 18 – Campo sônico próximo ao cristal [24].

Nas proximidades do cristal existe uma interferência ondulatória muito grande. À medida que nos afastamos do cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, tornando uma só frente de onda. À região próxima do cristal denomina-se Campo Próximo com uma extensão (N) que depende do diâmetro do cristal piezelétrico (D) e do comprimento de onda (λ) da vibração, podendo ser calculado pela equação 1:

$$N = D_{ef}^2 / 4 \lambda = D_{ef}^2 f / 4 v \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

D_{ef} = diâmetro efetivo do cristal. É a área acusticamente efetiva do cristal, que depende da sua forma geométrica. Para cristais circulares, $D_{ef} = 0,97 \times$ diâmetro do cristal. Para cristais retangulares, $D_{ef} = 0,97 \times$ metade do comprimento do lado maior do cristal.

f = frequência ultra-sônica.

$v = \text{velocidade de propagação do som} = l \times f$. Sendo: $v = 5900 \text{ m/s}$ ou 5900.000 mm/s , para o aço.

O campo próximo representa uma dificuldade na avaliação ou detecção de pequenas discontinuidades situadas na região próxima do transdutor.

A região, após o campo próximo, é o campo longínquo ou distante. Nesta região a onda sônica se diverge e diminui de intensidade quase que com o inverso do quadrado da distância. A forma do campo sônico é mostrada na figura 19.

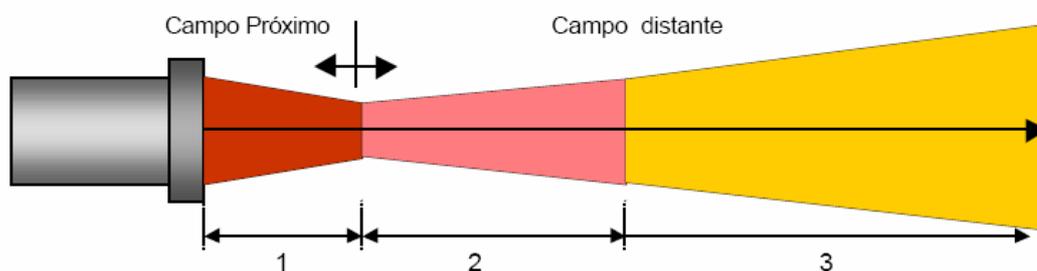


Figura 19 – Classificação das zonas do campo sônico [24].

O campo sônico de um transdutor é representado: pela região (1), onde pequenas discontinuidades são difíceis de serem detectadas (campo próximo); na região (2) discontinuidades maiores podem ser detectadas; e na região (3), onde qualquer discontinuidade, compatível com o comprimento de onda, pode ser detectada [24].

2.4.3.4. Técnica de inspeção

São basicamente três técnicas de inspeção para detecção de defeitos e até mesmo para analisar as tensões: imersão, transparência e pulso-eco (que foi a técnica utilizada neste trabalho), como mostrado na figura 20.

Na técnica de imersão é utilizado um transdutor de imersão à prova d'água, a peça é imersa em água, permitindo um acoplamento homogêneo, e os transdutores têm movimentos livres.

Na técnica de transparência são utilizados dois transdutores separados, um transmitindo e outro recebendo a onda ultra-sônica. Nesta técnica não se sabe posição ou extensão da discontinuidade.

A técnica Pulso - Eco é a técnica onde somente um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultra-sônicas que se propagam no material. Portanto, o transdutor é acoplado em somente um lado do material, podendo ser verificada a profundidade da descontinuidade, suas dimensões e localização na peça.

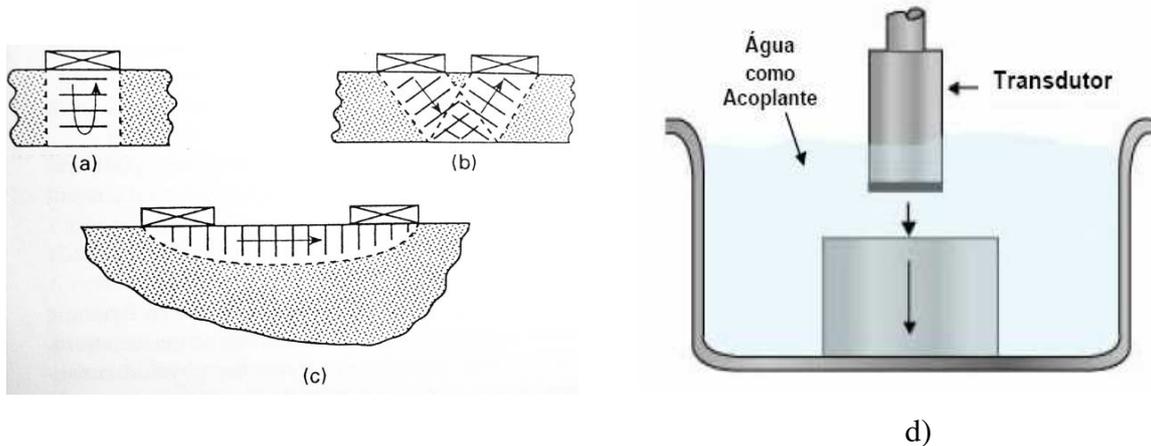


Figura 20 – Técnicas de inspeção: a) pulso-eco, b) e c) transparência e d) imersão [24].

2.4.3.5. Birrefringência acústica e acustoelasticidade

Materiais isotrópicos são materiais considerados como livres de tensão. Nesta condição a velocidade de propagação da onda ultra-sônica é constante, ou seja, não existe diferença de velocidade entre as ondas longitudinais, que são ondas compressivas incidentes com um movimento paralelo à direção de propagação da onda, e das ondas transversais, que tem polarização perpendicular à direção de propagação de onda.

Já para materiais anisotrópicos isto não ocorre, a velocidade das ondas longitudinal e transversal é diferente, o que pode ser melhor explicado por meio da birrefringência ótica. Quando um meio homogêneo é anisotrópico, um feixe de luz que o atravessa sofre dupla refração, gerando ondas que apresentam diferentes ângulos de polarização. Para materiais anisotrópicos a polarização não é necessariamente paralela, ou perpendicular à direção de propagação, é denotada quase longitudinal ou quase transversal. Materiais que apresentam esta propriedade são chamados duplamente refratores ou birrefringentes. A anisotropia do material é causada tanto pela textura, quanto pelo estado de tensão em um sólido elástico.

Essa variação da velocidade da onda ultra-sônica, ao percorrer um material elástico sob tensão, é chamada de efeito acustoelástico.

A descrição teórica do efeito acustoelástico, que relaciona a influência do estado de tensão do material à velocidade da onda ultra-sônica, somente foi possível considerando a teoria não linear (deformações finitas) da elasticidade.

Murnaghan incluiu termos de terceira ordem na definição da energia elástica e introduziu as constantes elásticas de terceira ordem (l, m e n que são as constantes de Murnaghan), na relação entre velocidade da onda ultra-sônica e a deformação que surge devido à tensão no material onde essa onda se propaga [30].

Constantes elásticas determinam a resposta do cristal (deformação) sob ação de tensão. A partir de constantes é possível calcular, pela teoria linear, constantes volumétricas, coeficientes de Poisson, entre outras. Mas pela teoria não linear, é necessário utilizar as constantes de Murnaghan.

A forma simplificada da equação, desenvolvida por Hughes e Kelly, é representada em termos da variação da velocidade da onda ultra-sônica, em relação à tensão, podendo ser apresentada na equações 2 e 3.

$$\frac{V_{pp}-V_l}{V_l} = K_1\sigma_p + K_2(\sigma_q + \sigma_s) \quad \text{Equação 2 com onda de incidência normal}$$

$$\frac{V_{pq}-V_t}{V_t} = K_3\sigma_p + K_4\sigma_q + K_5\sigma_s \quad \text{Equação 3 com onda de incidência cisalhante}$$

Onde V_t e V_l são as ondas isotrópicas transversal e longitudinal respectivamente; V_{ij} é a velocidade de propagação de onda ultra-sônica na direção i e polarizada na direção j ; σ_s é a tensão principal e K_n são as constantes acustoelásticas normalizadas. Assume-se: direção p como a direção da tensão componente principal; q direção transversal; e s a direção ortogonal, isto funciona bem para materiais isotrópicos [23]. 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.

Em um sólido homogêneo elástico, o tensor *tensão* σ_{ij} e o tensor *deformação* ϵ_u são de segunda ordem e ficam relacionados conforme lei de Hooke, pelo módulo de elasticidade ou de rigidez C_{ijkl} , conforme equação 4, onde k e l variam de 1 a 3. Em geral tensores de quarta ordem contêm 81 constantes elásticas de segunda ordem.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_u = \frac{1}{2} C_{ijkl}(u_{11}+u_{11})$$

Equação 4

Devido à simetria dos tensores *tensão* e *deformação*, o número de componentes independentes de C_{ijkl} para um sólido elástico reduz de 81 para 36. Assim, é possível representar o tensor elástico em notação compacta como uma matriz C_{ijkl} de 36 componentes, o que gera seis equações.

Considerações de energia de deformação de um cristal permitem mostrar que esta matriz é simétrica, $C_{ij} = C_{ji}$ de modo que, um sólido de anisotropia geral, possui apenas 21 constantes elásticas independentes.

Contudo, propriedades de simetria elástica, com relação a três planos cristalinos, permitem reduzir a quantidade de constantes elásticas; são chamados materiais ortotrópicos, sendo neste caso, só 12 das 21 componentes do tensor elástico são não nulas, das quais, por simetria, 9 são constantes independentes: as 6 da diagonal e as 3 simétricas, de modo que o número de constantes independentes se reduz a 5 [30].

A figura 21 mostra estas 5 constantes e a dependência da velocidade com a variação da polarização e propagação da direção para aços.

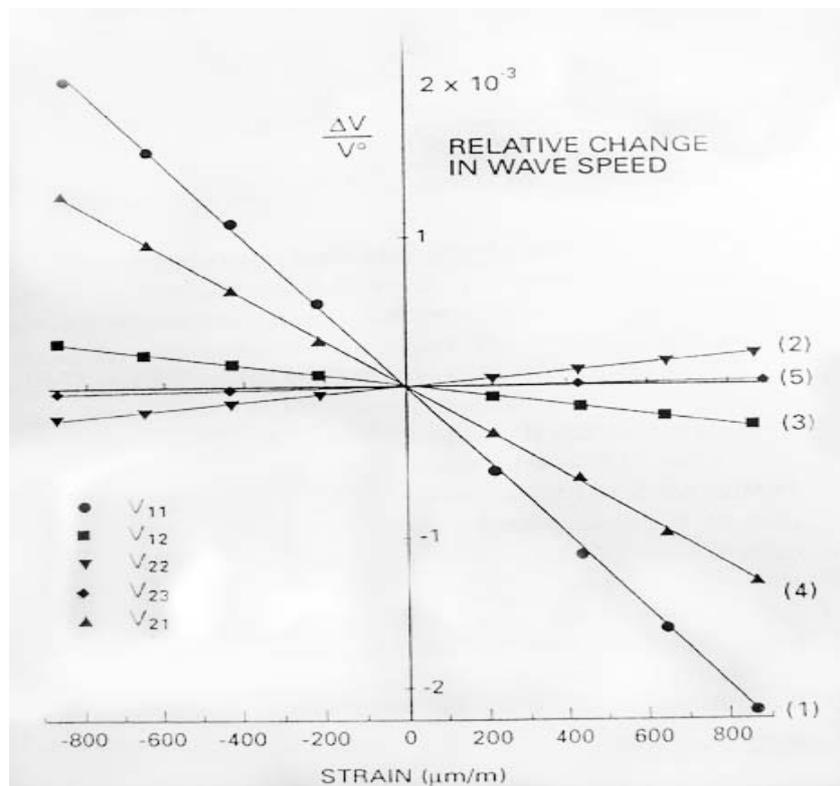


Figura 21 – Variação das constantes elásticas com a mudança de polarização da direção da onda.

Nota-se que K_1 , K_3 e K_4 são negativos e K_2 e K_5 são positivos. Logo o uso de ondas ultra-sônicas longitudinais de incidência normal no modo pulso-eco permite obter a tensão média na espessura de chapa metálica. Ao conjunto destas constantes trabalhadas por Tokuoka e Iwashimizu deu-se o nome de constante acustoelástica m .

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.

Na aplicação do ultra-som, para medida de tensão, utiliza-se o termo da birrefringência ao se empregar ondas cisalhantes e denomina-se birrefringência acústica à diferença fracional da velocidade ou tempo de onda ultra-sônica, em relação a duas direções perpendiculares, como pode ser visto na equação 5.

$$B = \frac{\frac{V_l - V_t}{V_l + V_t}}{2} = \frac{t_t - t_l}{t_t + t_l} \quad \text{Equação 5}$$

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

Em um material isotrópico, sem efeito da tensão ou textura, a onda ultra-sônica incidindo perpendicularmente ao material, quando polarizada em duas direções perpendiculares, retorna ao mesmo tempo; então $B = 0$.

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, e quando no material é aplicada uma tensão, as ondas têm velocidades diferentes e a equação que rege é a equação 6.

$$B - B_0 = m(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Equação 6}$$

Onde B é a birrefringência induzida pela textura e pelo estado de tensão do material, B_0 é a birrefringência induzida pela textura (deformação) e m a constante acustoelástica do material.

A vantagem de utilizar esta técnica é a de operar um instrumento pequeno e leve, oferecendo informações de tensões no interior da peça, não sendo sensível pela espessura do material nem pela temperatura. Como essas velocidades de propagação das ondas de ultra-som são medidas no mesmo ponto da peça e, praticamente, ao mesmo tempo, elas são influenciadas da mesma forma pela temperatura e/ou espessura, reduzindo assim, a uma medição do tempo de percurso das ondas ultra-sônicas. A desvantagem é o efeito da microestrutura, tendo variações microestruturais pontuais, como as que ocorrem em grãos, interfaces, segundas fases, precipitados, interstícios, lacunas e discordâncias, que alteram as constantes elásticas de terceira ordem, modificando, assim, as constantes acustoelásticas, influenciando a velocidade de propagação da onda de ultra-som na mesma magnitude que as tensões, sobre a velocidade e precisão da técnica.

2.5. Aplicação da técnica ultra-sônica para medição de tensão

Para a utilização da técnica ultra-sônica, uma medida com precisão de tempo de percurso da onda ultra-sônica precisa ser feita, seja em aplicações como na avaliação de porosidade em materiais cerâmicos, na determinação da direção de laminação e do tamanho de grão em materiais metálicos ou na caracterização do estado de tensões em materiais, já que as variações do tempo são na ordem de nanossegundos [28].

Com o intuito de vencer essa barreira para a aplicação da técnica ultra-sônica na avaliação de tensões, Bittencourt *et al.* desenvolveram uma metodologia para medição do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas, empregando o processamento do sinal ultra-sônico gerado, com um algoritmo de correlação cruzada e a técnica multitaxas para aumentar a resolução das medidas [28].

Os autores utilizaram uma chapa de alumínio, para medir através da técnica com correlação cruzada e sua comparação através de um equipamento eletrônico que capta o sinal em picossegundos.

Utilizaram a configuração pulso-eco, onde um único transdutor é usado como emissor/receptor, sendo o sinal adquirido correspondente a uma sucessão de ecos provenientes da face oposta a que o transdutor está acoplado. O tempo de percurso da

onda é o tempo medido entre dois ecos consecutivos. O transdutor usado foi de ondas transversais com incidência normal, com frequência de 2,25MHz.

O algoritmo de correlação cruzada, utilizado para o processamento do sinal ultra-sônico, se baseou na divisão do sinal adquirido, com dois ecos, de maneira a gerar dois sinais, com partes idênticas. Um dos sinais gerados era formado apenas pelo primeiro eco do sinal adquirido e o outro pelo sinal completo. O resultado da correlação cruzada entre esses dois sinais será, conceitualmente, o atraso entre eles. 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 de dados obtidos no osciloscópio, empregando-se a técnica multitaxas.

A eficiência do método desenvolvido foi verificada experimentalmente medindo-se, em um determinado ponto de uma chapa de alumínio, o tempo de percurso de uma onda ultra-sônica com um analisador de tempo de precisão de picosegundo. Nos experimentos realizados, o tempo de percurso da onda ultra-sônica medido, para o intervalo de confiança de 90%, foi $t = 2,6532 \pm 0,0014 \mu\text{s}$ e ao comparar com os resultados adquiridos no mesmo ponto pelo método da correlação e pela interpolação com correlação cruzada, os resultados são 100% eficientes. Na interpolação, foram empregados fatores de expansão (L) 4, 8 e 16.

Para avaliar se seria possível este método na avaliação de tensão, foi utilizada uma chapa de alumínio sujeita a diversos tipos de carregamento de tração. Utilizou a medição através de 2 pontos máximos de 2 ecos consecutivos e viu-se a dispersão em um mesmo ponto de até 40ns (4,95 μs e 4,99 μs , no caso do carregamento de 2000kgf). Esta variação pode ter sido causada por uma variação do carregamento aplicado. Parte do erro se deve à dificuldade na determinação do ponto máximo do eco como referência e pela distorção em diferentes regiões do eco, devido à característica de que quando o tempo de percurso aumenta, aumenta também a defasagem entre as duas ondas e a deformação do eco muda de lugar. Já com o método de correlação cruzada, a defasagem foi de apenas 2ns por ter feito medidas com uma casa decimal a mais, aumentando a resolução e diminuindo o erro de medida de tempo, provando a eficiência para as aplicações de medidas de tensão.

Andrino et al. [29], utilizou a técnica da acustoelasticidade para avaliar o perfil de tensões em juntas soldadas. O material estudado foi uma chapa de aço API 5L X65

com tratamento térmico de alívio de tensões após usinagem do chanfro. Logo após as chapas foram soldadas duas a duas pela técnica FCAW-G (“Flux Core Welding – Gás Shielded”) e jateadas para melhora da superfície. Os pontos a serem estudados foram definidos anterior ao cordão de solda e paralelamente ao mesmo, conforme figura 22.

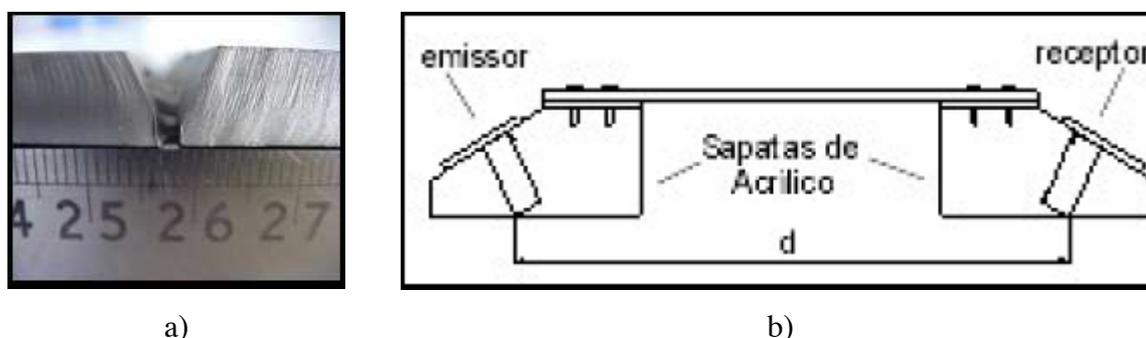


Figura 22 – Esquema do trabalho: a) Placas chanfradas para soldagem FCAW-G, b) forma de avaliação da onda [29].

Para avaliação da acustoelasticidade foi utilizada onda longitudinal, criticamente refratada com 2 transdutores incidindo a um ângulo de 28° , escolhido por ser, segundo a lei de Snell, o primeiro ângulo crítico a gerar uma onda longitudinal paralela à superfície.

Foram realizadas medidas na chapa antes da solda, após a solda e com um novo tratamento térmico. Para eliminar a variação da distância de percurso da onda foi feito um controle na força imposta ao conjunto através de uma célula de carga e um condicionador de sinais. Os resultados mostraram que o método da teoria acustoelástica foi capaz de identificar o alívio de tensões, embora com uma grande dispersão. Os valores obtidos foram coerentes com o formato esperado para a variação de tensões nas soldas.

Para o cálculo da tensão foi utilizada a constante acustoelástica do aço API 5L X70, levantada por Caetano em 2003 [43], no sentido transversal, pois o transdutor estava perpendicular à direção de laminação da placa. O resultado se mostrou coerente com a literatura, tendo um pico de tensão em 650 MPa, que é o limite de escoamento do material, e apresentou a redução da tensão na junta soldada entre as chapas antes e após o tratamento térmico, conforme visto na figura 23.

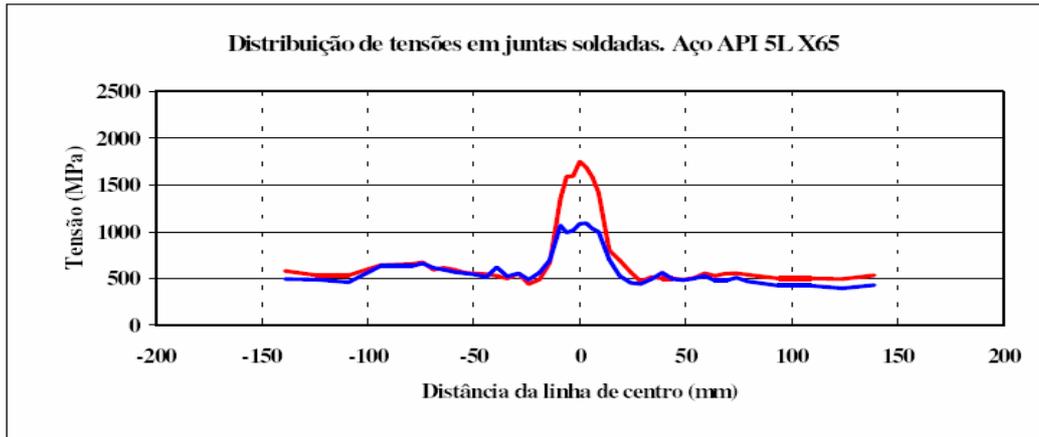


Figura 23 – Valores de tensão médios medidos antes (vermelho) e após (azul) o alívio de tensões [29].

Para corroborar com os resultados obtidos por Andrino, Medeiros *et al.* [31] utilizou a técnica ultra-sônica para o aço API 5L X65, porém com o valor da acustoelasticidade retirada de tiras do tubo soldado e ondas cisalhantes de incidência normal. As amostras foram retiradas do tubo com diâmetro de 365 mm e espessura de 7,85mm a +130mm e -130 mm da solda, +3h, +6h, +9h à solda, conforme figura 24.

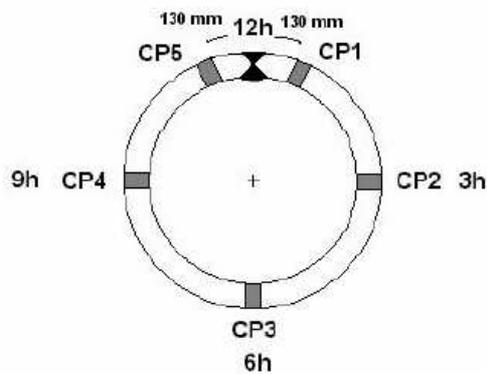


Figura 24 – Posicionamento das tiras no tubo [31].

Avaliou assim, a birrefringência do tubo íntegro e da tira, tendo como resultado a averiguação da anisotropia acústica em cada ponto do tubo, com cada tira se comportado como um pedaço de características mecânicas distintas. O relaxamento da tensão na tira, após retirá-la do tubo foi de 57%, ou de 15,8 para 6,7 kgf/mm², sendo a situação mais crítica, a tira retirada a 6h. Para tanto, foi feita normalização dos valores

da birrefringência com o valor crítico, tendo como resultado a perfeita curva de calibração da birrefringência acústica para o aço em questão.

Cardoso [30] utilizou a técnica da birrefringência, porém com tubos isotrópicos e conformados de aço API 5L X46, utilizando transdutor de 2,25 MHz com aquisição de tempos par a par, ou seja, após uma medida realizada na direção longitudinal, o transdutor era girado em 90° e media-se o tempo de percurso da onda na direção transversal; após essa segunda medida, retornava-se o transdutor para a posição longitudinal e dava-se início a um novo par de medidas. Os tubos também foram marcados conforme a referência da solda e, para o tubo isotrópico, suas medidas foram marcadas sem referência. No estudo verificou a diferença significativa dos valores de birrefringência entre os tubos isotrópicos e anisotrópicos, o que ele associou aos diferentes processos de fabricação.

O tubo com solda apresenta anisotropia acústica bem definida em todas as suas regiões, pelos valores negativos de birrefringência variando de $-6,0 \times 10^{-3}$ a $-9,0 \times 10^{-3}$ ao longo da seção circunferencial do tubo e pelo valor da constante acustoelástica, mostrando que cada parte do tubo se comporta com características mecânicas distintas entre si. É visto como dificuldade a escolha do termo de birrefringência que represente o estado inicial do material, B_0 . Já para o material sem solda, houve uma dispersão dos resultados, alternando entre valores positivos e negativos, e à linha representada como a 180° da referência definida apresentou isotropia com birrefringência igual a zero por todo o percurso. A diferença entre os valores no caso do tubo sem solda varia de 1,5 a 7,7 nanossegundos; no caso dos tubos com solda, de 43,3 a 58,8 nanossegundos, também atestando para o bom funcionamento da técnica.

Carmos [32] também analisou as tensões pelo método da birrefringência com ondas cisalhantes de incidência normal e pulso-eco, porém numa barra com flexão. Utilizando um único transdutor de 5MHz de frequência como emissor / receptor para a obtenção das variações de tempo ao longo da espessura da barra e o sinal adquirido correspondeu a uma sucessão de ecos provenientes da face, oposta a que o transdutor está acoplado.

O esquema montado foi bem parecido com o utilizado neste trabalho, capaz de gerar e receber ondas cisalhantes. Estes sinais foram submetidos a um processamento matemático (correlação cruzada com interpolação), para permitir a exatidão e resolução necessária às medidas do tempo de percurso da onda ultra-sônica.

O estudo foi sobre uma barra de aço SAE 1045 usinada, de medidas 900 x 93 x 45 mm e com acabamento superficial. A barra sofreu um carregamento de 8.000 kg (80% do limite de escoamento da barra) no equipamento para ensaio de flexão. Foram adquiridos os sinais ultra-sônicos estando à barra sem carregamento e com carregamento.

Pela técnica de birrefringência verificou a anisotropia da barra oriunda do processo de conformação mecânica e o maior grau de anisotropia nos pontos próximos dos laminadores pelos valores maiores da birrefringência com resultados variando de $2E-4$ a $1,4E-3$. Os valores foram tratados somente qualitativamente, já que não foi levantada a constante acustoelástica.

Num ensaio de flexão, a tensão imposta ora é trativa ora é compressiva e isto pode ser visto pelos valores de B-B0 negativo ou positivo. A técnica da birrefringência acústica foi capaz de avaliar a anisotropia da barra causada pela deformação devido ao processo de conformação mecânica de laminação e de identificar as tensões trativas e compressivas, assim como, identificar as regiões de maiores tensões no material mesmo sem conhecer o valor da tensão.

A fim de averiguar a influência do processo de fabricação de tubos na anisotropia acústica e da espessura utilizada, Bittencourt *et al.* [33] realizou experimentos com tubos soldados fabricados pela técnica ERW e UOE e também com diversas espessuras.

A técnica ultra-sônica aplicada utilizou ondas cisalhantes de incidência normal, transdutor de 2,25 MHz, com a anisotropia verificada em função de diferentes medidas de tempo de onda obtidas em um mesmo ponto, propagada em duas direções de polarização ortogonais entre si.

As medidas foram feitas nos tubos marcados a +130mm e -130 mm da solda, +3h, +6h, +9h à solda. As regiões tinham comprimento de 500 mm e largura de 50 mm. Em cada região foram feitas 05 (cinco) marcações para adquirir os sinais e em cada marcação foram feitas cinco medidas de birrefringência, gerando um total de 125 medidas por tubo.

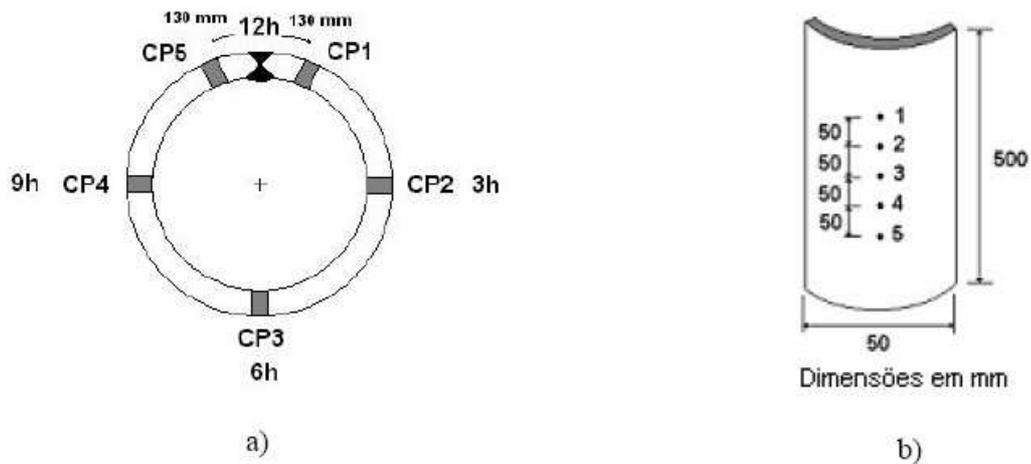


Figura 25 – Marcação do tubo: a) na direção circunferencial, b) direção longitudinal [33].

A variação dos resultados no sentido longitudinal, no mesmo ponto, foi de 2 a 10 nanossegundos, porém conforme tratamento estatístico, foram considerados iguais em todos os tubos, o que já não se pode afirmar na direção circunferencial do tubo, devido a alta anisotropia.

Verificou a influência da espessura na birrefringência de forma proporcional, quer dizer, que quanto maior a espessura, maior a birrefringência encontrada ao longo da circunferência do tubo. Com tubos de 6 mm, o B obtém valores entre 0,028 e 0,032 nanossegundos, para espessuras entre 8 e 9 mm, os valores de B assumem entre 0,038 e 0,050 nanossegundos e para espessura de 12mm entre 0,059 e 0,068 nanossegundos.

Com relação ao modo de fabricação, os tubos fabricados pelo processo ERW, tendo a mesma espessura, têm comportamento dentro de um padrão, o que ocorre o mesmo para o processo UOE, porém comparando os dois processos o UOE apresenta uma variação mais brusca da anisotropia com relação ao ERW.

Para a análise de tensão pela técnica da birrefringência, o problema levantado e demonstrado, é a variação anisotrópica na direção circunferencial dos tubos, já que torna difícil definir um valor de referência, o B_0 , a qualquer momento em qualquer ponto de uma tubulação, para a obtenção das tensões.

Matos [34], estudou a técnica de análises de tensão por ultra-som em um material tratado termicamente e depois de imputado a tensão pela ação de um furo no centro da chapa. Foi usado um transdutor de ondas cisalhantes de incidência normal, com frequência de 2,25 MHz em modo pulso-eco. As ondas foram aquisitadas com a

direção de polarização alinhada com a direção longitudinal do corpo-de-prova e perpendicular a esta.

O material era composto de 2 chapas de aço 1020 com dimensões de 300 x 300 x 25,4 mm, tratadas termicamente por recozimento. As amostras foram retiradas da chapa, de maneira que em uma foi retirado um disco e na outra um furo central. Os diâmetros do furo e do disco eram de 120 mm e 126 mm, respectivamente, afim de gerar tensão interna do furo.

Após dilatação da chapa com furo por maçarico e contração do disco através de resfriamento com nitrogênio por 40 minutos, ambos se encaixaram. Os tempos foram medidos na chapa com furo antes da confecção do corpo-de-prova e após, através de 20 pontos previamente marcados.

A constante acustoelástica para o material foi levantada por um ensaio de tração solicitado uniaxialmente, medidos em diferentes carregamentos, porém, todos abaixo do limite elástico. A constante acustoelástica do material determinada foi de $6.2 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$.

Como resultado ocorreu uma variação de tensão ao longo das direções principais de simetria do corpo-de-prova, com as maiores tensões próximas à região central do corpo-de-prova, onde foi inserido o disco, e vão diminuindo em direção a borda da chapa. Foi analisado a diferença de tensão, utilizando o B_0 de cada ponto e com um B_0 médio, onde constatou uma variação média de 12% (mínima de 2% e máxima de 62%), quando utilizado os valores de B_0 médio em relação àqueles obtidos pelo B_0 no ponto. Isso indica que é possível uma avaliação de tensão por ultra-som, pelo método da birrefringência acústica, sem a necessidade de conhecimento prévio das medidas da birrefringência inicial, no ponto a ser investigado, uma vez que existe a possibilidade do uso da birrefringência inicial média levantada num corpo-de-prova do mesmo material livre de tensão.

Considerando a chapa inicial como isotrópica, homogênea e sujeita a estado plano de tensões, já que recebeu o tratamento térmico, utilizou as equações 7 e 8 para calcular a diferença entre as tensões principais σ_1 (tensão tangencial) e σ_2 (tensão radial), considerando um sistema cilíndrico de coordenadas.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{(2 c^2 d^2) p}{(d^2 - c^2) r^2} \quad \text{Equação 7}$$

Onde c é o raio interno do furo (=60 mm), d a metade do comprimento da chapa ($d=150$ mm) e p , a pressão de contato entre o disco e a chapa, é dada pela equação 8.

$$p = \frac{E \Delta}{2 c} \left(1 - \frac{c^2}{d^2} \right) \quad \text{Equação 8}$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material (2.1×10^5 MPa) e Δ , a diferença entre os raios do disco e do furo (0,15 mm).

As diferenças percentuais entre os valores experimentais e analíticos da distribuição de tensões foram de 6% (diferença mínima) e 30% (diferença máxima). Para comparação com o valor analítico foram consideradas as médias dos valores experimentais obtidos a partir dos 4 valores em cruz na mesma distância radial.

2.6. 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 a partir de levantamentos bibliográficos, 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 absoluto cuidado pela indústria. Dentre as técnicas não destrutivas utilizadas atualmente, a técnica ultrassônica baseada na acustoelasticidade mostra-se promissora para medição de tensões residuais em tubos.

3 - Materiais e metodologia de estudo

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os materiais de estudo deste trabalho, os ensaios para caracterizações químicas, mecânicas e metalográfica, bem como os ensaios de birrefringência acústica pelo método ultra-sônico, realizados na avaliação acustoelástica.

3.2. Material de estudo

Na avaliação acustoelástica foram utilizadas 4 chapas quadradas de 500 mm de lado com 13 mm de espessura e 4 tubos de 144 mm de diâmetro interno e 10 mm de espessura, como pode ser visto na figura 26. Ambos de aço-carbono tipo API 5L X70, fabricados pela CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, e cedidos pela *Apolo Tubulars*, fabricante de tubos de aço para os setores petrolíferos e construção civil.



Figura 26 – Material de estudo: a) tubos soldados, b) chapas.

3.3. Caracterização química e mecânica

Foi retirado uma amostra de cada chapa de aço estudada, para análise da composição química, nas dependências da *Apolo Tubulars*, através do espectrofotômetro de emissão óptica, marca SPECTRO MAXX / 2007, que utiliza o

comprimento de onda característico de cada elemento para calcular a composição química de qualquer material em estado sólido.

As características mecânicas do material, como limite de escoamento - que é o ponto máximo onde o material mantém as propriedades elásticas -, limite de resistência - que é o ponto máximo que o material se deforma, antes de formar o empescoamento - e alongamento, foram obtidas durante um ensaio de tração de um corpo-de-prova, fabricado conforme norma ASTM E8-69, na máquina de tração de marca Kratos / 1980 de 100 kN. Os dados podem ser vistos na tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização do material

<u>Tabela de propriedades</u>						
<u>Elementos químicos (%)</u>			<u>Propriedades mecânicas (MPa,%)</u>			
	Especificado	Analizado		Especificado	Analizado	
					<i>Chapa 1</i>	<i>Chapa 2</i>
<i>C</i>	0,26	0,1035	<i>LE</i> ¹	483	498	493
<i>Mn</i>	1,65	1,3150	<i>LR</i> ²	565	548	603
<i>P</i>	0,025	0,0175	<i>Al</i> ³	21	32,2	31,7
<i>S</i>	0,015	0,0046				
<i>Nb+V+Ti</i>	0,15	0,0540				
<i>B</i>	<0,001	0,0005				
<i>Si*</i>	-	0,2385				
<i>Outros</i> ⁴	-	0,1072				
<i>Ceq</i> ⁵	-	0,3460				
<i>Pcm</i> ⁶	-	0,1820				

¹ Limite de escoamento

² Limite de resistência

³ Alongamento

⁴ Os demais elementos químicos não têm especificações, segundo a norma API 5L, devem ser acordados entre o fabricante e o cliente.

⁵ Carbono equivalente, é uma medida de percentual de elementos de liga responsáveis pelo endurecimento do aço por solução intersticial e calculado através da equação 9:

$$Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V) /5 + (Ni + Cu) /15 \quad \text{Equação 9}$$

⁶ Weld Metal Cracking Parameter é uma medida do quanto o metal suporta uma trinca e é válida somente para aços com baixo teor de carbono, igual ou inferior a 0,12% e pode ser calculado pela equação 10:

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad \text{Equação 10}$$

3.4. Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural consiste num exame metalográfico da peça a fim de obter informações sobre sua estrutura, podendo correlacioná-la com propriedade física, esclarecendo ou antevendo seu comportamento em operação. Ela consiste numa análise micrográfica e macrográfica da peça, podendo determinar a sua microestrutura, defeitos internos, segregações, inclusões, entre outros.

Uma análise qualitativa é compreendida como um estudo de caráter descritivo dos constituintes microestruturais presentes nas amostras, podendo ser feita por observação direta no microscópio, utilizando os métodos mais adequados para o exame da microestrutura do material, acompanhada da documentação por micrografias, fotografias da microestrutura, utilizando sistemas fotográficos dos microscópios. Uma análise quantitativa foi utilizada para a medição do tamanho dos grãos de ferrita dos aços, baseado na norma ASTM E 112-96 [46].

Com o auxílio de um microscópio óptico modelo M. G. Olympus Tokyo 1999, figura 27, equipado com um conjunto de padrões metalográficos e um sistema fotográfico que permite observações por campo claro, campo escuro e luz polarizada, possibilitando as análises qualitativas e quantitativas das amostras, foi realizada análise do material. As amostras foram retiradas de 2 bobinas diferentes no início do desenrolador, no processo de fabricação de tubos na *Apolo Tubulars*.

As amostras foram cortadas e usinadas com o objetivo de obter peças planas de 5 cm de comprimento por 1 cm de largura.

As amostras foram lixadas para melhorar o aspecto superficial do lado onde se examinaria. Foram utilizadas lixadeiras automáticas com lixas de 200 a 1200 mesh, com o auxílio de água para evitar encruamento local. A cada troca de lixa girava-se cerca de 90° a peça, para que não ficasse marcado com a orientação da mesma.

Após estas operações realizou-se a análise macrográfica com um aumento de 10 vezes, para percepção de impurezas e de homogeneidade da peça.

A partir daí foi realizado o polimento em disco de feltro com abrasivo de alumina em politriz automática para eliminação de qualquer defeito superficial e assim poder obter a melhor reflexão de luz durante a análise micrográfica. Utilizou-se um ataque químico com nital, solução de ácido nítrico a 10%, para revelar os contornos de

grão e a estrutura interna. O nital tem como propriedade o ataque somente a ferrita, transparecendo desta forma todas as estruturas que a tem como componente, por exemplo, a perlita.

Após esta operação realizou-se a análise micrográfica com aumento de 100 até 1000 vezes para análise da microestrutura e orientação dos grãos.

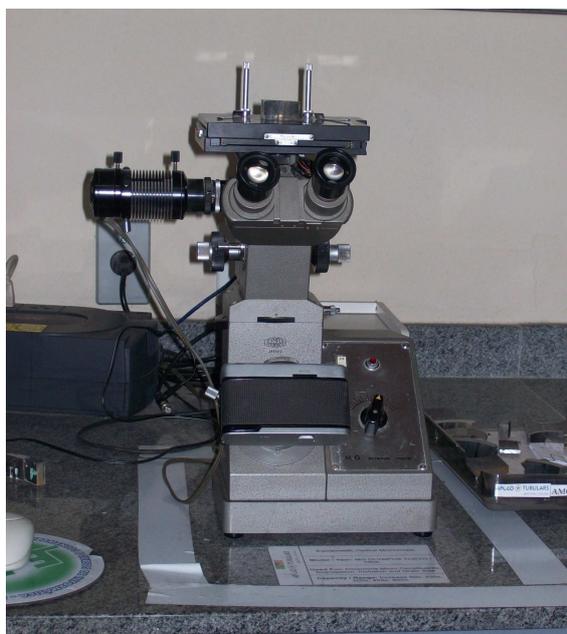


Figura 27 – Microscópio óptico utilizado nas análises metalográficas.

3.5. Equipamentos utilizados para aquisição de tempo de onda

Para a realização dos ensaios, necessários à aquisição do tempo de onda ultra-sônica, foi utilizado um gerador de pulso modelo Panametrics EPOCH 4 pela técnica de inspeção pulso-eco, conectado a um osciloscópio Tektronik TDS 3032, com um transdutor de onda transversal de 11 mm de diâmetro e frequência nominal de 2,25 MHz e um atrasador de pulso, ligados a um computador com o programa *Wavestar*, capaz de captar a imagem e os dados de tempo de onda ultra-sônica. O acoplante utilizado foi o do fabricante Panametrics, com a finalidade de eliminar as camadas de ar entre o transdutor e a chapa, reduzindo as impedâncias acústicas, que é a quantidade de energia acústica que reflete e transmite para o meio.

O esquema utilizado no presente trabalho é apresentado nas figura 28 e 29.

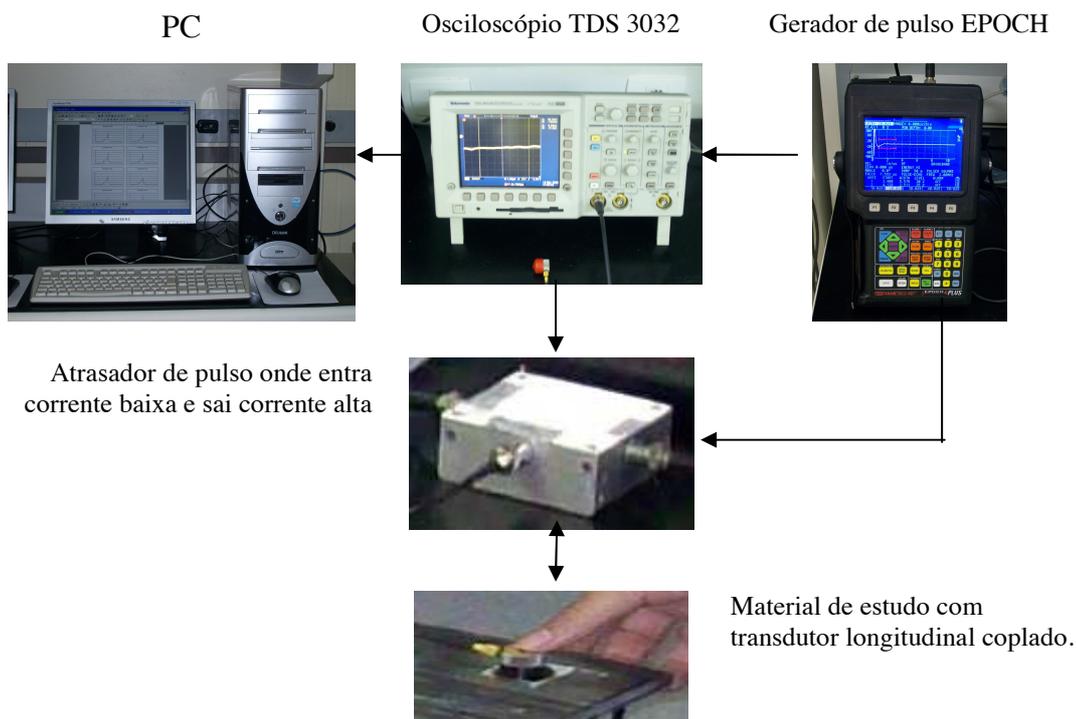


Figura 28 – Esquema de aquisição de dados.



Figura 29 – Esquema de aquisição de dados.

Para o tratamento destes dados utilizou-se um programa desenvolvido pelo IEN, chamado *Chronos*, e que possibilita melhorar a correlação entre os mesmos fazendo

uma interpolação tipo L4, onde se insere três novos pontos entre os 2 pontos do sinal original e também capaz de calcular a birrefringência do material através de cálculos matemáticos, conforme descrito por *Bittencourt et al* [28].

As telas dos programas do sinal e do *Chronos* seguem na figura 30.

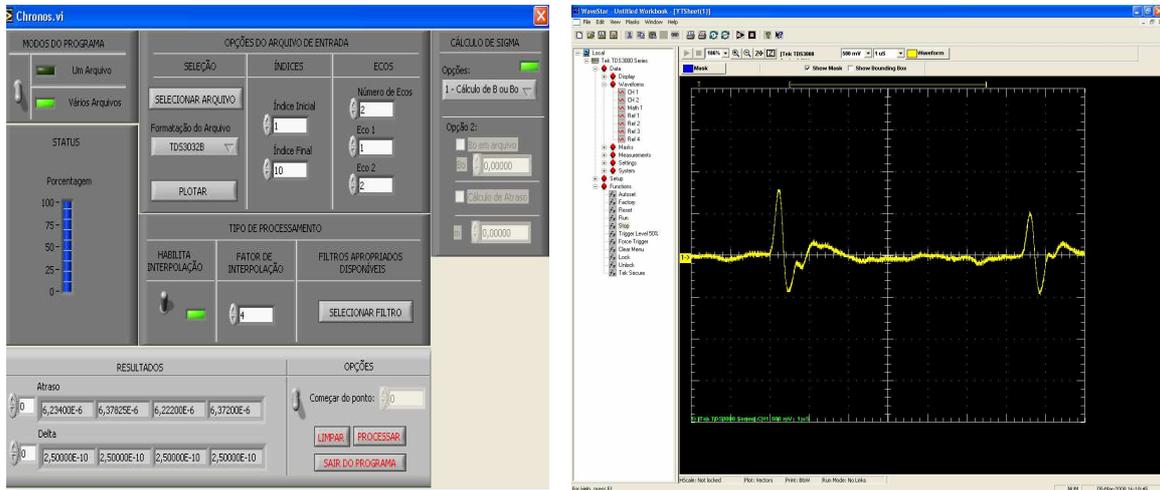


Figura 30 – Software de aquisição de dados: a) quadro do *Chronos* fazendo a interpolação, b) aquisição do tempo de onda.

3.6. Medição da constante acustoelástica

A segunda etapa do trabalho consistiu em levantar as constantes acustoelástica do material a partir de 4 corpos-de-prova, usinados conforme Norma ASTM E8-69, como mostrado na figura 31, retirados de 2 bobinas de aço API 5L X70, corridas 6627 e 6628; sendo 1 corpo-de-prova localizado no início e outro no final de cada bobina, no sentido longitudinal ao sentido de laminação. Foram também confeccionados outros 2 corpos-de-prova, 1 do início e outro no final de cada bobina, porém no sentido transversal ao sentido de laminação, a fim de averiguar possíveis diferenças nos valores, visto que a constante acustoelástica é em função do tipo de material e da textura.

O ensaio consistiu em medir o tempo de percurso da onda ultra-sônica cisalhante em duas direções de polarização da onda.



Figura 31 – Corpo-de-prova para levantamento da constante acustoelástica.

Os ensaios consistiram em realizar 3 pares de medidas de tempo de percurso de onda cisalhante em posições ortogonais entre si, utilizando o equipamento descrito anteriormente, durante o ensaio de tração do corpo-de-prova. A máquina de tração utilizada foi da marca Kratos de 100 kN nas instalações da *Apolo Tubulars*.

O corpo-de-prova foi carregado até o limite de escoamento do material (12000 N ou 480 MPa), sendo interrompida e sustentada a cada $1000 \pm 60\text{N}$ para a realização da série de medição. Dessa forma, foi possível calcular a birrefringência acústica, dada pela equação 5.

$$B = \frac{V_t - V_l}{\frac{V_t - V_l}{2}} = \frac{t_l - t_t}{\frac{t_l - t_t}{2}} \quad \text{Equação 5}$$

Com os valores da birrefringência em cada tensão foi possível calcular a constante acustoelástica, que é o coeficiente angular da reta, no caso dos aços, descrita pela equação 6 e obtida através dos gráficos de birrefringência x tensão. As demais variáveis da equação (B , B_0 e σ) são obtidas durante o ensaio.

$$B - B_0 = m (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Equação 6}$$

Os corpos-de-prova foram denominados como início (cabeça - C) ou fim (cauda -T), longitudinal (L) ou transversal (T) das chapas 1 e 2, que eram referentes às bobinas 6628 e 6627, respectivamente. Os dados foram coletados no mesmo ponto, previamente

estabelecidos e preparados, com o objetivo de serem eqüidistantes das extremidades e isentos de irregularidades superficiais, que poderiam atrapalhar o acoplamento do transdutor. A temperatura ambiente durante o ensaio foi de 21° C. O tempo total de realização de cada corpo-de-prova foi de aproximadamente 1 hora e meia, em média.

Foram necessários 4 operadores, um para adquirir os sinais durante o ensaio, operando o equipamento, fazendo os ajustes do sinal e salvando as medidas de tempo e os processar no programa *Chronos*, outro para assegurar que o transdutor se encontrasse na posição correta e bem acoplado durante a aquisição dos sinais, outro para operar a máquina de tração e por fim, outro para assegurar que a variação da força estivesse dentro dos limites estabelecidos, enquanto a mesma se mantinha sustentada para a aquisição dos sinais naquele ponto.

Antes de iniciar o ensaio foram realizados 3 pares de medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica no local indicado, figura 32, para detectar qual era o valor inicial da birrefringência acústica (B_0) do corpo-de-prova. Sempre que uma medida era adquirida o transdutor era girado de 90°C, afim que ficasse ora longitudinal ora transversal ao sentido de laminação do material, dessa forma, com os valores dos pares foi possível calcular a birrefringência.

Durante o ensaio, foi também efetuado a aquisição de 3 pares de medidas de tempo de onda ultra-sônica em cada carga sustentada, para que os dados fossem representativos.



Figura 32 – Aquisição dos tempos de onda durante o carregamento.

A fim de averiguar os dados e compará-los, foi utilizado um método estatístico, e o que se adequa para esta comparação é o método de intervalo de confiança e da hipótese nula.

O intervalo de confiança de um parâmetro populacional fornece um intervalo no qual se está confiante da cobertura do verdadeiro valor do parâmetro. Para amostras pequenas, o desvio padrão é uma estimativa pouco confiável de média da população e não se pode estimar uma distribuição normal. Por isso, foi utilizado um valor maior para refletir a redução na confiança.

Obteve-se o valor requerido da tabela de distribuição *t* – **Distribuição T de Student**. Tomamos o valor correspondente à linha $r = n-1$ graus de liberdade. Quanto menor n , ou seja, números de experimentos, maiores os valores de t . Então um intervalo de confiança exato é dado pela equação 11.

$$\left(\bar{X} - t_{(n-1,0.05)} \times \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{X} + t_{(n-1,0.05)} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Para comparar os valores e averiguar se existe diferença significativa entre as constantes acustoelásticas, nos sentidos longitudinais e transversais ao sentido de laminação, utiliza-se o teste de Hipótese para comparação de médias independentes. Primeiro estabelece a hipótese nula que será testada.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Como o número de experimentos é pequeno e a média amostral é independente, calcula-se a variância combinada pela equação 12.

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad \text{Equação 12}$$

A seguir calcula-se a estatística do teste t_{cal} e compara com o valor de T_{tab} com n_1+n_2-2 graus de liberdade, conforme anexo II. A hipótese nula será rejeitada se $t_{cal} > T_{tab}$ com $\alpha/2$.

$$t_{cal} = \frac{x_1 - x_2}{S_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

3.7. Medição da birrefringência acústica

A etapa seguinte foi a de realizar a aquisição do tempo de onda ultra-sônica nas chapas de aço API 5L X70 laminadas a quente, retirada das bobinas 6627 e 6628 no início e fim de cada uma e tubos da mesma chapa fabricados pelo processo *Apolo Tubulars*, que consiste numa conformação controlada, fazendo as tiras de aço passarem por entre rolos até atingirem a forma do tubo e após, há a soldagem, do tipo por indução a alta frequência com um rebarbamento interno e externo. As dimensões das peças já foram descritas no item 3.2.

Os ensaios consistiram na medição de 10 pares de tempo de percurso de onda ultra-sônica, em 40 pontos distintos, de 3 zonas selecionadas na chapa, extremidades e meio.

Os pontos foram dispostos de forma a abranger toda a chapa, porém equidistantes entre si cerca de 5 cm e afastados 2 cm das bordas. A disposição é conforme figura 33.

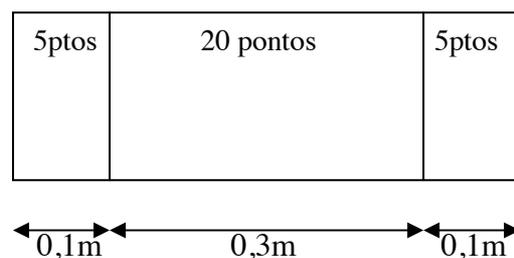


Figura 33 – Esquema da tira medida.

Os pontos selecionados foram identificados começando na lateral e crescendo no sentido do comprimento na chapa, na direção longitudinal à direção de laminação, lixados para evitar irregularidades na superfície e limpos para obter o melhor acoplamento do transdutor à chapa, sem interferências.

Para os tubos foram medidos 10 pares de tempo de percurso de onda ultra-sônica em 20 pontos distintos, dispostos conforme à posição da solda no tubo: +12h, +3h, +6h,

+9h, -12h em 4 linhas circunferenciais ao longo do comprimento, distantes de 10 cm uma da outra, para evitar interferência da onda emitida de um ponto a outro e abranger a maior parte do tubo, sendo que os primeiros pontos afastados 2 cm da borda usinada. A disposição é conforme figura 34.

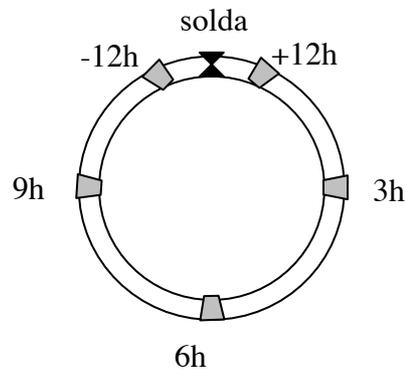


Figura 34 – Regiões dos tubos analisados.

O equipamento e o acoplante utilizado foram descritos anteriormente.

Durante todo o processo foi feito o acompanhamento da temperatura ambiente através de um termômetro, visto que para melhor estabilidade dos resultados, aguardava-se um tempo para que se igualassem as temperaturas. Trabalhou-se sempre com $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$, conforme estudo sobre a influência da temperatura de Miyaura [50].

Os ecos utilizados para obtenção do tempo de onda ultra-sônica foram o terceiro e o quarto ecos. Esta escolha foi feita com base na amplitude do eco mostrado na tela e na influência do campo próximo ao cristal piezelétrico, responsável pela geração da onda ultra-sônica, mostrando estes picos não serem uma região de alta interferência ondulatória. O tamanho do campo próximo é em função do diâmetro efetivo do cristal do transdutor e pode ser calculado pela equação 1.

$$N = D_{ef}^2 / 4.\lambda = D_{ef}^2 .f / 4.v \quad \text{Equação 1}$$

Para o caso do transdutor utilizado de frequência 2,25 MHz, diâmetro 11mm, e a velocidade sendo constante para aços igual a 5900.000 mm/s, o tamanho do campo próximo é de 17,015 mm. Sendo que a espessura da chapa variou de 10 a 10,6mm, logo após o terceiro eco não há mais interferência ondulatória.

Foram necessários 2 operadores para adquirir os sinais durante o ensaio, um para captar os sinais de medida de tempo e outro para assegurar que o transdutor se encontrasse na posição correta e bem acoplado à peça durante a aquisição dos sinais.

Para analisar a variação de tensões entre o início e fim de cada bobina e tubo e entre as bobinas e os tubos, foram utilizadas análises estatísticas com testes de hipóteses para duas médias, análise de regressão e teste de normalidade.

Um método de regressão simples é uma análise estatística utilizando o conceito de correlação/covariância. Ela explica a relação entre duas variáveis, chamadas de variável dependente e variável independente.

Para duas séries de dados, X (X₁, X₂,...) and Y(Y₁, Y₂,...), a covariância fornece uma medida não padronizada do grau que as duas variáveis se movem juntas, e é estimada tomando o produto dos desvios da média para cada variável em cada período, conforme equação 14.

$$\text{Covariância} = \sigma_{xy} = \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y) \quad \text{Equação 14}$$

O sinal da covariância indica o tipo de relação que as duas variáveis tem. Um sinal positivo indica que elas movem juntas e um negativo que elas movem em direções opostas, porém é difícil fazer julgamentos sobre o poder do relacionamento entre as duas variáveis, observando a covariância, pois ela não é padronizada.

A correlação é a medida padronizada da relação entre duas variáveis. Ela pode ser calculada da covariância, como a equação 15.

$$\text{Correlação} = \rho_{xy} = \sigma_{xy} / \sigma_x \sigma_y = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \mu_y)^2}} \quad \text{Equação 15}$$

A correlação nunca pode ser maior do que 1 ou menor do que -1. Uma correlação próxima a zero indica que as duas variáveis não estão relacionadas. Uma correlação positiva indica que as duas variáveis movem juntas, e a relação é forte, quanto mais a correlação se aproxima de 1. Uma correlação negativa indica que as duas variáveis movem-se em direções opostas e que a relação também fica mais forte quanto mais próxima de -1 estiver.

Na regressão, quando as duas variáveis são plotadas uma contra a outra num gráfico de espalhamento, ela tenta ajustar uma linha reta através dos pontos de tal modo que minimiza a soma dos desvios quadrados dos pontos da linha. Conseqüentemente, ela é chamada de regressão ordinária dos mínimos quadrados (OLS). Quando tal linha é ajustada, dois parâmetros emergem - um é o ponto em que a linha corta o eixo Y, chamado de intercepção da regressão, e o outro é a inclinação da linha de regressão.

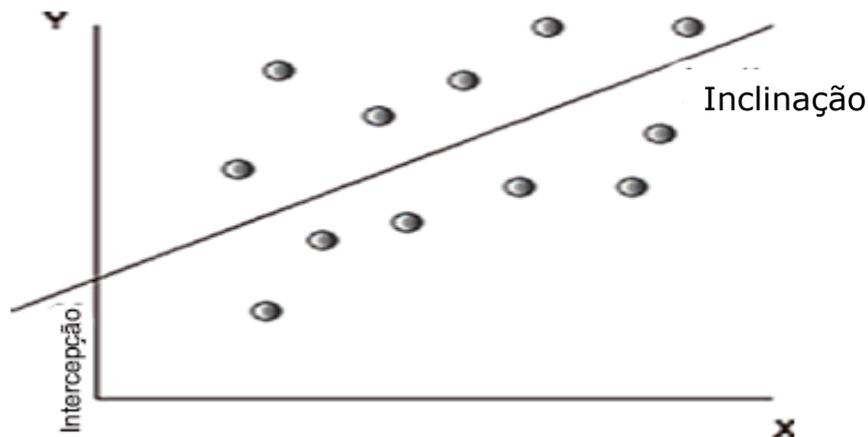


Figura 35 – Gráfico de regressão $Y = a + b X$

A inclinação (b) da reta mede a direção e a magnitude da relação. Quando as duas variáveis estão correlacionadas positivamente, a inclinação também será positiva. Quando as duas variáveis estão correlacionadas negativamente, a inclinação será negativa. A magnitude da inclinação da regressão pode ser lida como um acréscimo unitário na variável (X); a variável dependente mudará por b (inclinação). A intercepção (a) da regressão pode ser lida como o valor que Y terá quando X é zero. Uma outra é mais direta e está baseada em como ela é calculada.

O R-quadrado da regressão é uma medida de erro e corresponde a proporção da variabilidade em Y que é explicada por X , dada pela equação 16.

$$\text{R-quadrado da Regressão} = \text{Correlação}_{yx}^2 = \rho_{yx}^2 = \frac{b^2 \sigma_x^2}{\sigma_y^2} \quad \text{Equação 16}$$

Um valor de R-quadrado muito próximo de 1, indica uma forte relação entre as duas variáveis, apesar da relação poder ser positiva ou negativa. Uma outra medida do erro numa regressão é o erro padrão, que mede o "espalhamento" ao redor de cada um dos dois parâmetros estimados - a intercepção e a inclinação. Cada parâmetro tem um erro padrão associado, calculado pelas equações 17 e 18.

$$\text{Erro Padrão da Intercepção} = SE_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} X_i^2 \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - hX)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^{i=0} (X_i - \mu x)^2}}$$

Equação 17

$$\text{Erro Padrão da Inclinação} = SE_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - hX)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^{i=0} (X_i - \mu x)^2}}$$

Equação 18

Se supuser uma distribuição normal, a estimativa do parâmetro e o erro padrão podem ser combinados para obter uma "estatística t", que mede se a relação é estatisticamente significativa.

Estatística T para a intercepção = a/SEa

Estatística T da inclinação = b/SEb

A regressão que mede a relação entre duas variáveis torna-se uma regressão múltipla, quando ela é estendida para incluir mais do que uma variável independente (X_1, X_2, X_3, X_4), na tentativa de explicar a variável dependente Y. Enquanto as apresentações gráficas tornam-se mais difíceis, a regressão múltipla conduz a uma forma que é uma extensão da regressão simples.

$$Y = a + b X_1 + c X_2 + dX_3 + eX_4$$

Equação 19

O R-quadrado mede ainda a força da relação, mas é necessário um R-quadrado ajustado, calculado para contar a tendência que induziria o R-quadrado a manter crescente, quando as variáveis independentes são adicionadas à regressão. Se existem k variáveis independentes na regressão, o R-quadrado ajustado é calculado pela equação 20.

$$\text{R-quadrado Ajustado} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - hX_i)^2}{n - k}$$

Equação 20

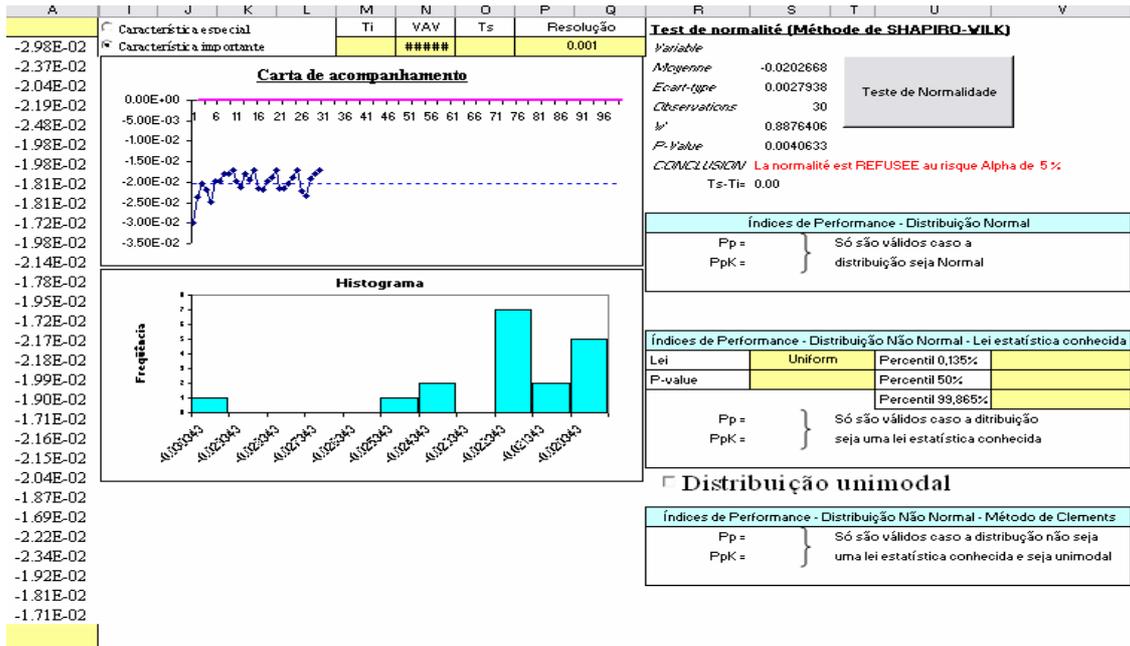
A correlação cruzada das variáveis independentes é chamada multi-colinearidade. Podemos dizer que, quando existe multi-colinearidade:

- os coeficientes sobre cada uma das variáveis independentes tornam-se muito mais difíceis para ler isolados, pois as variáveis começam a procurar uma às outras;

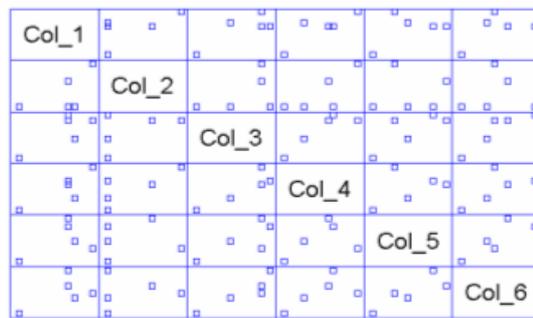
- a estatística t relatada tende a exagerar a significância da relação;
- a regressão ainda tem poder de previsão.

Toda a regressão está baseada numa relação linear entre a variável dependente e a variável independente. Quando a relação é não-linear é preciso transformar as variáveis.

Para todos estes cálculos foi utilizado um programa estatístico chamado Statigraf e uma planilha para analisar a normalidade dos dados, conforme figura 36.



a)



b)

Figura 36 – Planilha de estatística: a) verificação da normalidade, b) Statigraphics.

Para que uma análise qualitativa e quantitativa, do estado de tensão residual presente nos tubos, pudesse ser realizada, os tubos foram cortados. Conforme literatura, 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 foram realizados por oxi-corte automático, exatamente na solda. O local foi escolhido de forma que não perdesse nenhum ponto de referência anterior. Um pequeno corte foi feito na ponta do tubo, para avaliar a quantidade de material que se perde neste processo, visto na figura 37. Então se processa o corte ininterrupto do tubo utilizando como parâmetro a pressão de oxigênio de 2,5 kgf, pressão de acetileno de 1 kgf, com velocidade de corte de 500 mm/min, sem pré aquecimento e com bico de 8 mm; um pouco diferente do que é especificado pelo fabricante da máquina para a espessura do material, desta forma pudemos controlar melhor a distância da zona termicamente afetada.



Figura 37 – Medição da perda do material pelo processo de oxi-corte.

Foram utilizadas 2 canetas de temperatura, marca Tempils Tik de 152° e 253° C, para avaliar a temperatura que chegaria na marcação a +12h e -12h, como também na parte interna do tubo à 6h. Nenhum dos locais chegou a 152° C, o que provou que, com os parâmetros utilizados, não influenciou na microestrutura dos pontos de medida (conforme figura 38 a).

Ao final dos cortes foram medidas as aberturas dos tubos e diminuída da quantidade de material perdido no processo de corte por oxiacetileno (figura 38 b).

Junto com a abertura final ocorreu um barulho também referente ao alívio de tensões do material.



a)

b)

Figura 38 – Corte do tubo: a) sem interferência da temperatura, b) medição da abertura total do tubo.

Após o processo, foram medidos, nos mesmos pontos anteriores, a birrefringência acústica, figura 39, a fim de avaliar o estado das tensões residuais nos tubos, através do comportamento da birrefringência antes e após os cortes dos materiais.



Figura 39 – Medição da birrefringência acústica nos mesmos pontos.

3.8. Considerações finais

Foi apresentado o material utilizado como base e a metodologia para caracterização microestrutural do mesmo. Foram descritos: as chapas e os tubos em estudo neste trabalho; bem como o funcionamento do equipamento e a metodologia a ser aplicada, para realização dos ensaios de avaliação de tensões, utilizando a acustoelasticidade.

Capítulo 4 - Resultados e discussões

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de birrefringência acústica entre a chapa e o tubo, a relação entre eles, os ensaios para levantamento da constante acustoelástica, bem como a avaliação estrutural do material.

4.2. Caracterização microestrutural do material

Para caracterizar o material, foi realizada a análise metalográfica, a fim de detectar alguma variação na estrutura e homogeneidade da peça.

Na macroscopia observou-se a presença de inclusões do tipo óxido globular fino (D-2), classificado conforme formulário ASTM E 45-51 no anexo I. A figura 40 mostra as macrografias obtidas das amostras retiradas da bobina 6627 e 6628.

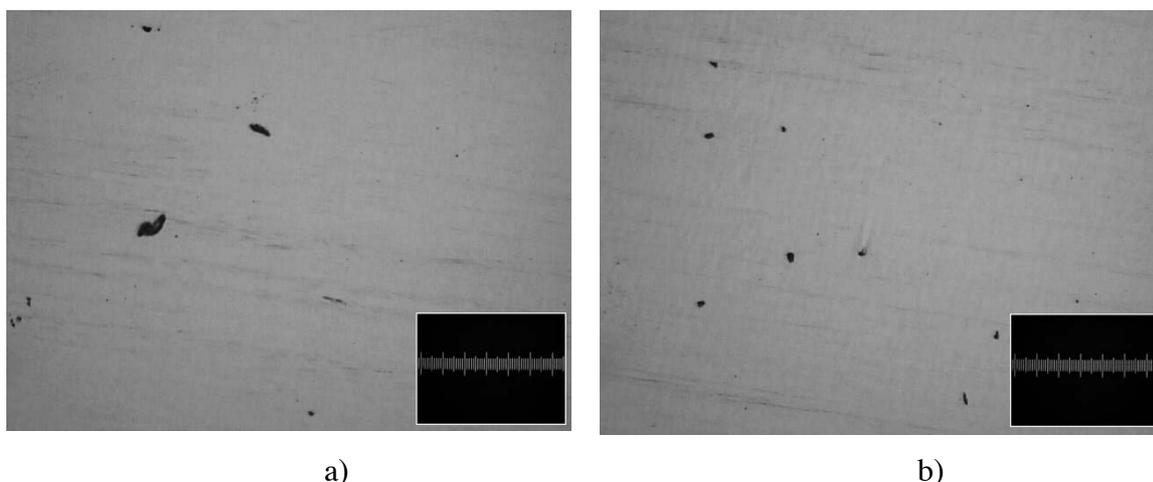


Figura 40 – Macrografia das bobinas: a) 6627, b) 6628.

Durante o ensaio de microscopia óptica, com o aumento de 200 vezes e ataque de nital 10%, percebe-se a presença de grãos tamanho 10, determinados através de softwares, respeitando a norma ASTM E 112-96 (46), com uma leve orientação preferencial, característica de aços laminados a quente, onde durante a laminação os grãos sofrem tratamento térmico de normalização simultaneamente, reorientando sua configuração. A figura 41 mostra as análises de orientação de grão.

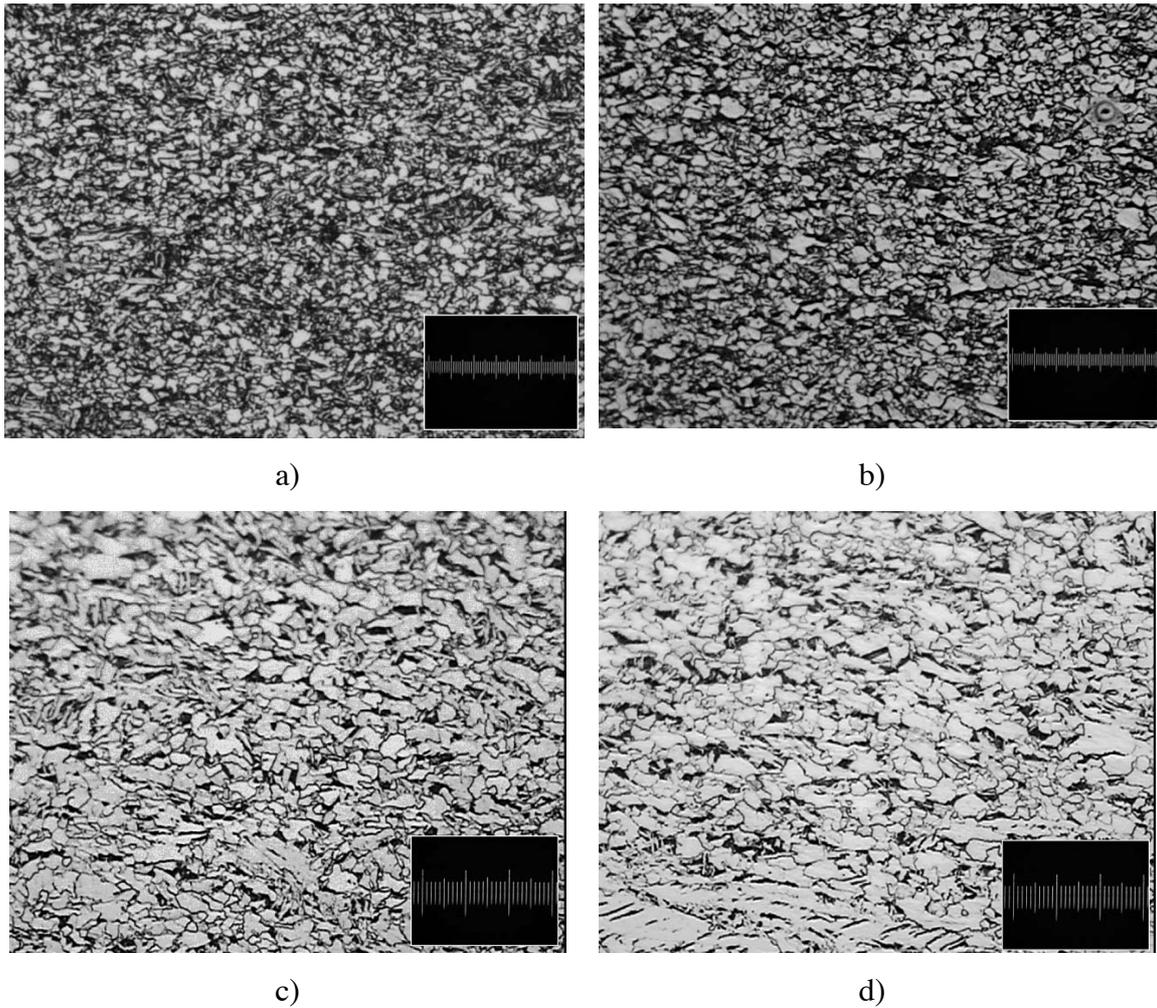


Figura 41 - Micrografia das amostras: a)6627 transversal, b)6628 transversal, c) 6627 transversal, d) 6627 longitudinal.

A microscopia do material apresenta estrutura metalúrgica ferrítica com pequenas ilhas de perlita fina, isto se deve à presença de manganês e outros elementos de liga responsáveis pela alteração da curva CCT, formando perlita, mesmo com baixo teor de carbono, o que está de acordo com a literatura [51]. Observa-se a estrutura na figura 42.

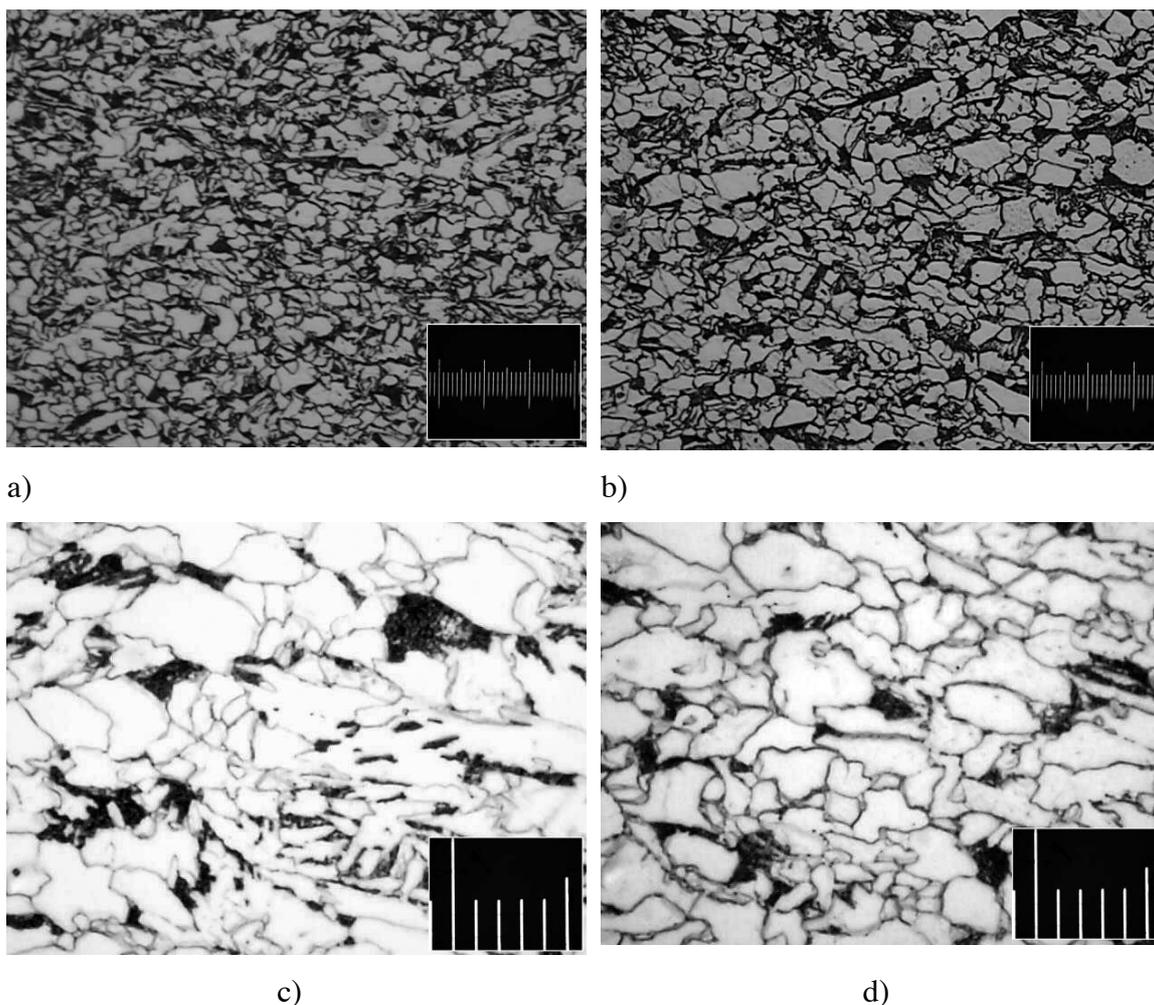


Figura 42 – Análise metalográfica estrutural: a e c) bobina 6627, b e d) bobina 6628.

Verifica-se que não há diferenças entre as bobinas, quanto ao tamanho de grão e percentual de perlita, apresentando desta forma uma homogeneidade das corridas, isto é favorável para diminuir a anisotropia acústica do material.

4.3. Levantamento da constante acustoelástica

Foram feitas análises de tração com carregamento uniaxial até o limite de escoamento do material. As amostras foram retiradas das bobinas, a fim de evitar qualquer interferência provocada pela deformação referente ao processo de conformação em tubos.

Os resultados do ensaio nos corpos-de-prova, do início e fim das bobinas retirados no sentido longitudinal ao sentido de laminação do material, podem ser observados na figura 43. Os corpos-de-prova foram tratados como início (cabeça - C)

ou fim (cauda -T), longitudinal (L) ou transversal (T) e chapas 6628 (1) ou 6627 (2). Na tabela 4 está apresentada a equação das retas obtidas pelos resultados de ensaio, lembrando que o coeficiente angular da reta é o valor da constante acustoelástica.

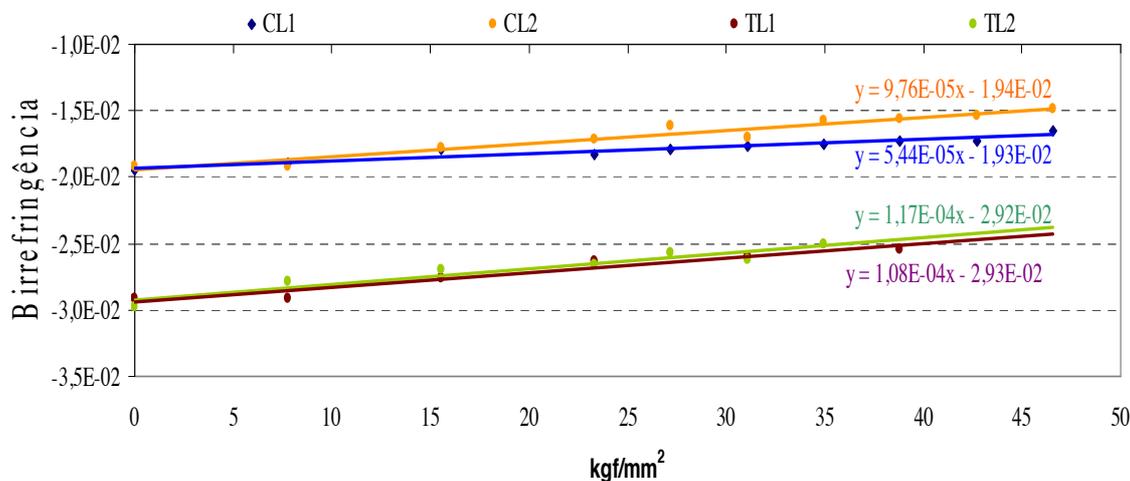


Figura 43 – Resultados dos ensaios de acustoelasticidade de 4 corpos-de-prova de aço API 5L X70 no sentido longitudinal ao sentido de laminação.

Tabela 4 – Equações das retas obtidas pelo ensaio de ultra-som com corpo-de-prova no sentido longitudinal ao sentido de laminação.

Local	Equação da reta
CL1	$y = 5,44E-05x - 1,93E-02$
CL2	$y = 9,76E-05x - 1,94E-02$
TL1	$y = 1,08E-04x - 2,93E-02$
TL2	$y = 1,17E-04x - 2,92E-02$

A constante acustoelástica é analisada com as equações da reta retiradas dos corpos-de-prova no sentido longitudinal ao sentido de laminação, pois conforme *Ortega et al.* (30), no sentido longitudinal não há variação nas constantes elásticas, diferentemente das demais direções, o que o erro imposto é importante para a aquisição de dados de tempo de onda ultra-sônica.

Foi identificado, durante a realização do ensaio de tração, um desvio de comportamento na amostra CL1 (início da chapa 6628 no sentido longitudinal). Elevou-se a amostra de 1000 kgf a 17000 kgf, de 1000 em 1000 kgf, muito acima do limite de escoamento calculado. Não se percebeu a deformação plástica no gráfico, nem

alteração na birrefringência. Este desvio confirma a alteração dos resultados da acustoelasticidade, na mesma, serem bem diferentes. Por este motivo, sugere-se descartar os resultados desta amostra.

Analisando a constante acustoelástica houve uma variação de $9,76E-05$ a $11,70E-05$, o que dá uma diferença de $1,94E-05$. Se comparado com os resultados obtidos por Bittencourt (36), para os materiais API 5L X70, fabricados por ERW e UOE com diferentes espessuras, os valores da constante acustoelástica obtidos no trabalho do autor citado, foram da ordem de $9,08E-05$ a $10,80E-05$, bem constantes e próximas do material estudado, visto na figura 44.

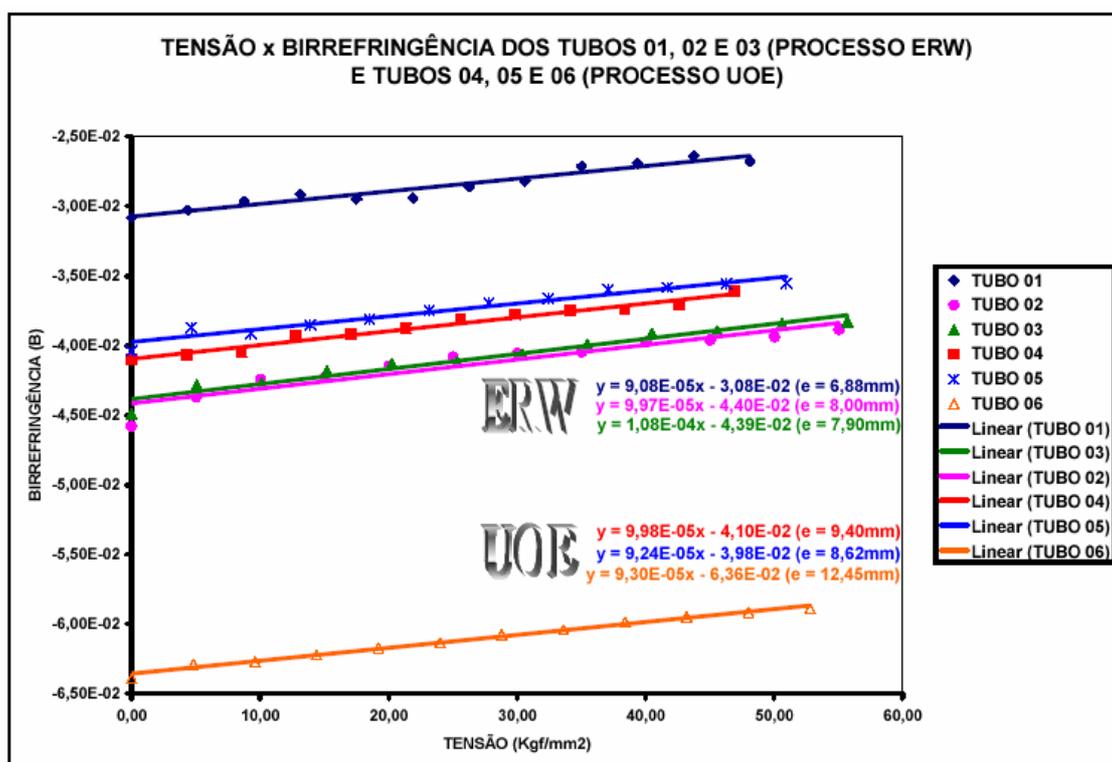


Figura 44 – Resultado encontrado em diversos tubos API 5L X70 por Bittencourt et al.

O tubo 4 do referido trabalho é o que mais se aproxima, em espessura, do material estudado da *Apolo Tubular*; porém, é realizado pelo processo UOE. Mas no trabalho não se verifica diferenças com relação ao processo, nem com relação a espessura. É importante notar, que a análise foi feita com tiras do tubo pronto e o presente estudo com corpo-de-prova retirado da bobina, sem a influência da tensão induzida pela deformação da chapa, o que sabemos, influenciar no valor da birrefringência.

Realizando os cálculos da diferença de tensão, no trabalho de Bittencourt, viu-se que a avaliação da constante acustoelástica para tubos do mesmo material pode ser considerada admissível para a técnica da birrefringência acústica, uma vez que o erro máximo encontrado no valor da tensão foi em torno de 11%, decorrente da conformação.

Analisando a influência da variação da constante no cálculo de tensão, no material, pela técnica da birrefringência acústica, e considerando os dois extremos da constante para este material, foi feita a seguinte consideração: tomando como exemplo, na bobina 6627 – chapa 2 no fim, cuja constante acustoelástica medida, foi de $11,70E-05 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}^{-1}$, com os dados do ponto de tensão aplicada de 35 kgf/mm^2 , $B_0 = -2,93E-2$ e $B = -2,51E-2$, calculou-se a tensão através da equação 6 e foi de $35,99 \text{ kgf/mm}^2$, com um erro de 2,8%. Utilizando os valores limítrofes de constante acustoelástica, que no caso é do início da chapa 2, de $9,76E-5 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}^{-1}$, cujo o resultado da tensão com os mesmos parâmetros fica em $43,15 \text{ kgf/mm}^2$, gerando um erro de 19% em relação à tensão aplicada. Fazendo uma média da constante acustoelástica, com o $m = 10,70E-05 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}^{-1}$ e com os dados anteriores, obtém-se um valor de tensão de $39,25 \text{ kgf/mm}^2$, com um erro de apenas 11%, o que é considerado admissível neste caso, seguindo o trabalho de Bittencourt (36).

Comparando com o valor do limite de escoamento (480 Mpa), a diferença entre início e fim de chapa, neste caso, é de $7,15 \text{ kgf/mm}^2$, ou seja, 70 Mpa, ou 15%, o que reforça a pequena influência deste parâmetro.

Analisando a birrefringência inicial, pela figura 43, percebe-se que o comportamento da bobina entre seu início e fim é diferente quando exposto à tensão, o que é razoável supor, visto que se mede a anisotropia do material, causada pela tensão e pela textura; e o final da bobina é o ponto onde mais sofre deformação pela própria ação do peso da bobina, figura 45, com isso a distância das moléculas é menor fazendo a velocidade de percurso da onda ser mais rápida. Este comportamento é homogêneo para as bobinas, já que não há diferença entre 1 e 2.



Figura 45 – Modo de bobinamento.

Para verificar a influência dos valores da birrefringência inicial (B_0) obtidos, sendo no gráfico o ponto onde a reta intercepta o eixo y, utilizou-se a equação 6 na avaliação deste efeito no tensão:

$$B - B_0 = m(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Equação 6}$$

De um ponto qualquer do fim da reta da chapa 1, considerando um carregamento uniaxial, portanto $\sigma_2=0$, utilizando o m , respectivo:

Fim chapa 1

$$B_0 = -2,92E-2$$

$$B = -2,54E-2$$

$$m = 10,8E-5 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}^{-1}$$

$$\sigma_1 = (B-B_0) / m = 35,40 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\Delta \sigma \text{ medida (39 kgf/mm}^2\text{)} \quad 10 \%$$

Percebe-se que a diferença de tensão com relação à tensão medida de 39 kgf/mm² é de 10%.

Considerando o B_0 de um ponto qualquer da reta da chapa 2, com carregamento uniaxial $\sigma_2=0$, com m de cada parte:

	<u>Início chapa 2</u>	<u>Fim chapa 2</u>
$B_0 =$	-1,94E-2	-2,93E-2
$B =$	-1,57E-2	-2,52E-2
$m =$	9,76E-5 (kgf/mm ²) ⁻¹	11,7E-5 (kgf/mm ²) ⁻¹
$\sigma_1 = (B-B_0) / m =$	37,54 kgf/mm ²	35,99 kgf/mm ²
$\Delta \sigma \text{ medida (35kgf/mm}^2\text{)}$	6,8%	2,8%

A maior diferença entre a tensão aplicada é de 7%. Porém se fizer com 1 ponto fixo ($B=-1,57E-2$) e m médio entre início e fim ($m=10,7E-5$) modificando somente o B_0 dá uma diferença de 72% no valor da tensão, entendendo que o valor da birrefringência inicial tem forte influência no resultado de tensão residual pela técnica da birrefringência.

Na figura 46 e na tabela 5, encontram-se os resultados do ensaio no sentido transversal ao sentido de laminação. Este foi analisado somente para averiguar se haveriam diferenças de valores de constante acustoelástica.

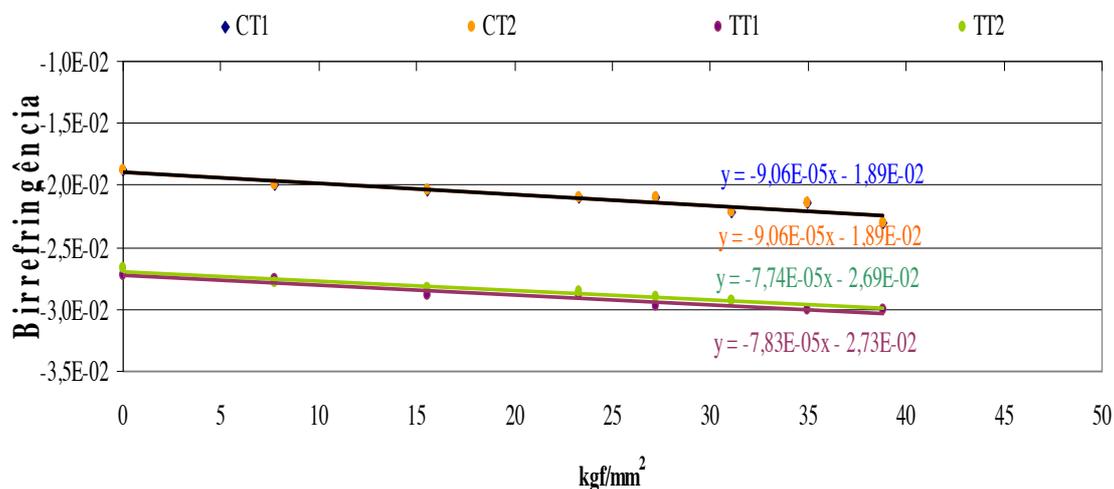


Figura 46 – Resultados dos ensaios de acustoelasticidade de 4 corpos-de-prova de aço API 5L X70 no sentido transversal ao sentido de laminação.

Tabela 5 – Equações das retas obtidas pelo ensaio de ultra-som com corpo-de-prova no sentido longitudinal ao sentido de laminação.

Local	Equação da reta
CT1	$y = -9,06E-05x - 1,89E-2$
CT2	$y = -9,06E-05x - 1,89E-2$
TT1	$y = -7,83E-05x - 2,73E-2$
TT2	$y = -7,74E-05x - 2,69E-2$

Pelo gráfico, verifica-se a mesma dispersão, com relação a birrefringência inicial, entre o início e fim de bobina, que o observado com o corpo-de-prova no sentido longitudinal ao sentido de laminação do material, com a ressalva das retas serem em sentidos opostos e a constante acustoelástica se apresentarem mais dispersa e com valores negativos. Isto, porque se manteve a notação durante a aquisição dos dados de tempo de onda, sendo números ímpares o sentido longitudinal ao sentido de laminação do material e números pares ao sentido transversal ao sentido de laminação, onde então no cálculo da birrefringência se obteve os valores negativos. Aqui se percebe a homogeneidade da corrida, pois não há diferença entre as bobinas.

Analisando a tensão, para o valor de 27 kgf/mm² e escolhendo os valores limítrofes, que são o início e fim da chapa 2, tendo como parâmetros B₀ = -2,69E-02, B = -2,91E-02 e m = -9,06 E-05 e -7,74 E-05, respectivamente, os valores das tensões calculadas são de 23,98 e 28,07 kgf/mm², dando um máximo de erro de 13%.

Fazendo a diferença entre os dois valores de tensão, utilizando estes dois extremos de B_{0 Transversal}, percebe-se que é de 4,09 kgf/mm², ou seja, 41 Mpa, isto é 8% do valor do limite de escoamento do material, o que reforça a teoria de não haver influência significativa da constante acustoelástica.

Para manter a metodologia de estudo e analisar a birrefringência inicial, escolheu-se a chapa 2 para ser estudada:

	<u>Início chapa 2</u>	<u>Fim chapa 1</u>
B ₀ =	-1,89E-2	-2,69E-2
B =	-2,09E-2	-2,91E-2
m =	-9,06E-5 (kgf/mm ²) ⁻¹	-7,74E-5 (kgf/mm ²) ⁻¹
σ ₁ = (B-B ₀) / m =	22,79 kgf/mm ²	28,07 kgf/mm ²
Δ σ medida (27 kgf/mm ²)	18%	4%

A diferença de tensão, com relação à tensão aplicada, neste caso é mais alta que a longitudinal. Se fizermos com a birrefringência do final da chapa, a constante acustoelástica média (m=-8,40E-5 kgf/mm²)⁻¹, alternando somente o m, então a diferença é de 130% do valor da tensão.

Na tabela 6 estão os resultados do coeficiente angular de cada reta, ou seja, o valor da constante acustoelástica.

Tabela 6 – Resultados do coeficiente angular de cada bobina no início e fim da chapa nos sentidos longitudinais e transversais ao sentido de laminação.

	Longitudinal (L)		Transversal (T)	
	<i>Início (C)</i>	<i>Fim (T)</i>	<i>Início (C)</i>	<i>Fim (T)</i>
Bobina 6628 (1)	-	1,08E-04	-9,06E-05	-7,83E-05
Bobina 6627 (2)	9,76E-05	1,17E-04	-9,06E-05	-7,74E-05

Para averiguar o grau de distorção dos dados, foi analisado o desvio padrão em cada etapa. Como o valor da constante acustoelástica do início da chapa 1, no sentido longitudinal, descartado, logo, não há desvio padrão para o mesmo.

Tabela 7 – Desvio padrão entre início e fim de cada chapa, nos sentidos longitudinais e transversais ao sentido de laminação.

	Longitudinal	Transversal
Bobina 6628 (1)	-	8,70E-06
Bobina 6627 (2)	1,37E-05	9,33E-06

Todos os valores do desvio padrão são pequenos, podendo-se estimar que são sensíveis à alteração do estado de tensões no material.

Utilizando o teste de hipótese para médias com intervalo de confiança de 95% e considerando os valores em módulos, visto que a diferença direcional entre os valores da constante acustoelástica no sentido longitudinal e transversal, ter como explicação a notação estipulada, como já comentado; foi verificada a média longitudinal e transversais da bobina 2 e não são diferentes, já com a bobina 1 isto não ocorre devido ao erro do corpo-de-prova do início. Quando se compara as médias das bobinas 1 (6628) e 2 (6627), juntando os valores, elas são estatisticamente iguais, ou seja, não há diferença entre as bobinas. E quando se compara os módulos dos valores entre início e fim das 2 bobinas, estatisticamente, elas também não são diferentes. Como se verifica na tabela 8.

Tabela 8 – Resultado do teste de hipótese com intervalo de confiança de 95%.

	<i>Comparando bobina 1 e 2</i>	<i>Comparando início e fim das bobinas</i>
$x_1 - x_2 =$	1,33E-05	-2,46E-05
$(n_1 - 1)S_1^2$	2,90E-08	1,91E-08
$(n_2 - 1)S_2^2$	3,69E-08	3,63E-08
S_p^2	1,10E-08	9,23E-09
tcal=	0,18	-0,34
Tab=	2,132	2,132

Logo, se comprova estatisticamente a homogeneidade da corrida, o que é interessante no aspecto da perpetuação da técnica da birrefringência acústica. Dada a diferença entre início e fim da bobina, supõe-se que seja do local de retirada da amostra,

pois, sabe-se que durante o processo de laminação da chapa, este é o local onde se concentram maiores defeitos metalúrgicos, pois há os ajustes de parâmetros do laminador e também sofre a influência do bobinamento.

4.4. Medição da birrefringência acústica na chapa

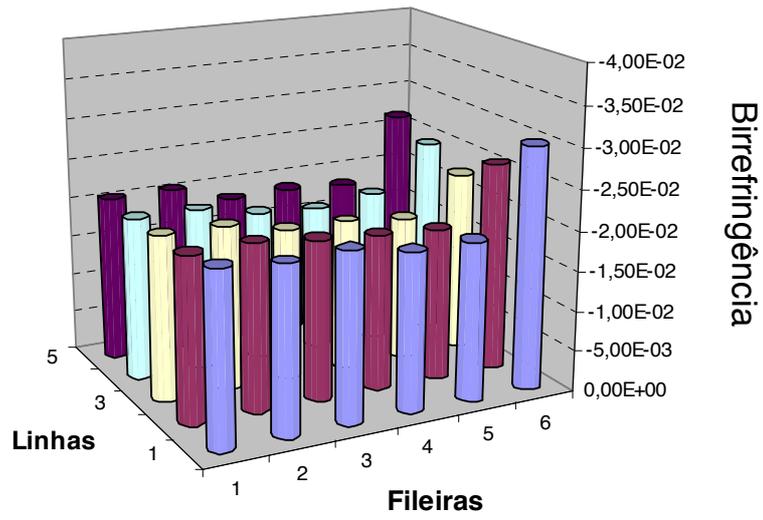
Na avaliação acustoelástica do material utilizado para fabricação de tubos para condução de petróleo e gás, pelo processo da *Apolo Tubulars*, foram realizadas medidas de birrefringência do início e fim de cada bobina.

As chapas foram retiradas das bobinas e cortadas conforme o diâmetro do tubo e distribuídas em 3 seções: 2 laterais que são consideradas como propensas a maior tensão interna, devido ao processo de corte das extremidades, e 1 no meio. As laterais tinham 10 cm de largura e o meio 30 cm. Os pontos foram distribuídos uniformemente em 6 fileiras verticais ao sentido de laminação do material e 5 pontos ao longo de cada linha. Dessa maneira foram obtidos 10 valores de birrefringência em cada ponto de cada região.

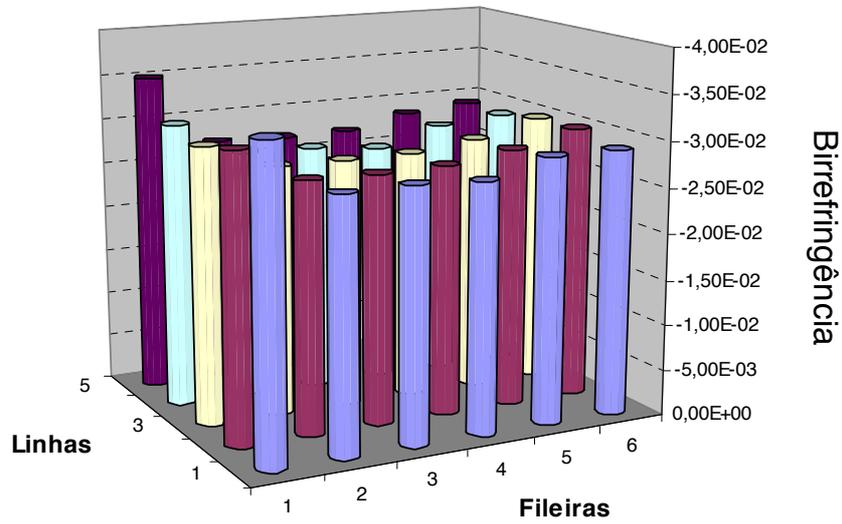
As medidas começaram na lateral esquerda percorrendo os pontos no sentido vertical, o mesmo da laminação. Após mudava-se de linha e fazia o mesmo percurso, como indicado na figura 47. Uma análise do tempo medidos em cada ponto em ambas as direções, foi feita para averiguar se houve alguma variação importante. O resultado de birrefringência acústica em cada região de cada chapa, no início e no fim, são apresentados nas figuras 48 e 49. As seis curvas representam as fileiras ao longo da largura da chapa.

5ª linha	5	10	15	20	25	30
4ª linha	4	9	14	19	24	29
3ª linha	3	8	13	18	23	28
2ª linha	2	7	12	17	22	27
1ª linha	1	6	11	16	21	26
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
	fileira	fileira	fileira	fileira	fileira	fileira

Figura 47 – Esquema de pontos da chapa.

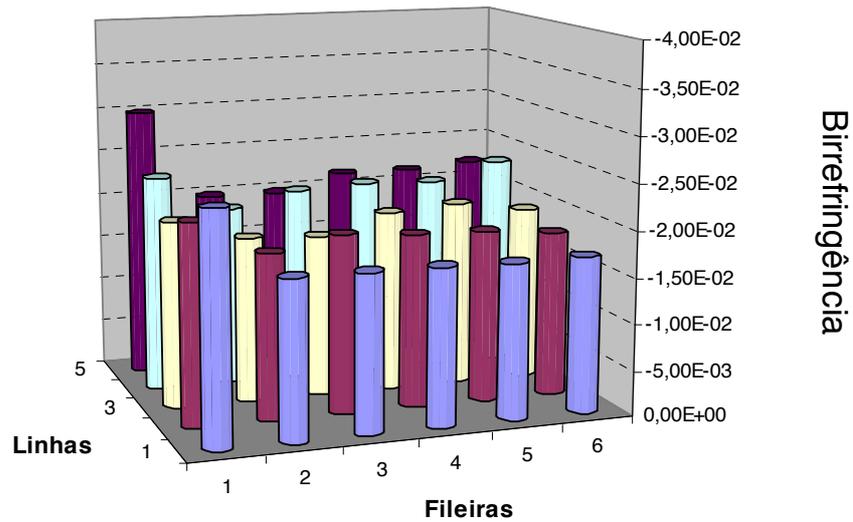


a)

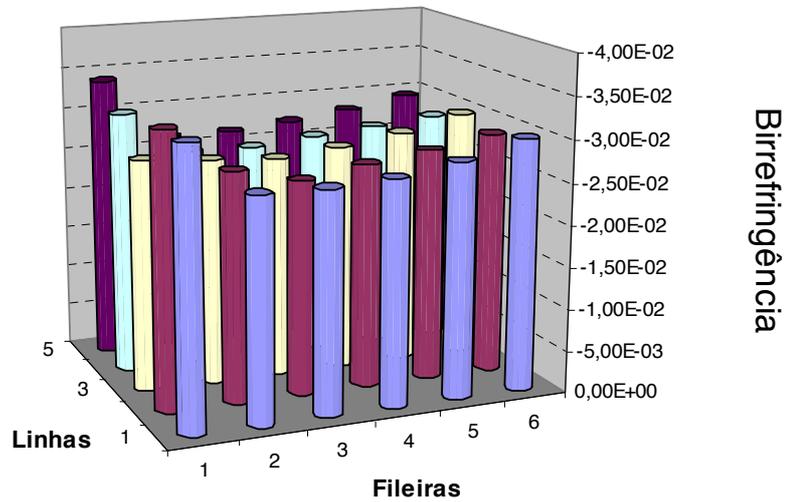


b)

Figura 48 - Comportamento da birrefringência acústica na chapa 1 a) ao longo do início da bobina, b) ao longo do fim da bobina.



a)



b)

Figura 49 - Comportamento da birrefringência acústica da chapa 2: a) ao longo do início da bobina, b) ao longo do fim da bobina.

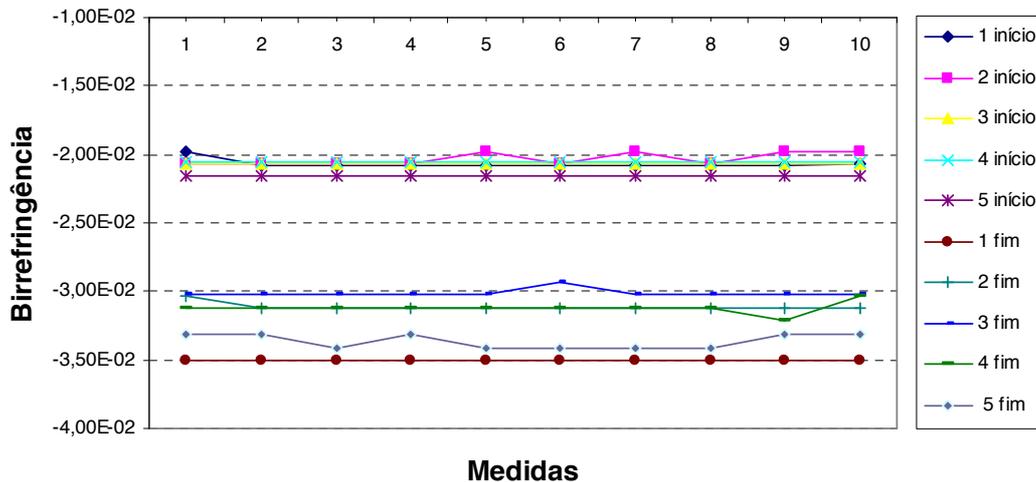
Nota-se que a primeira e a sexta fileira sempre tem o comportamento diferente das demais, provavelmente por serem o ponto de corte da bobina, no tamanho do diâmetro do tubo a ser produzido. Ao longo das chapas as variações foram homogêneas entre início e fim da bobina, tendo no início valores de $-1,80E-02$ a $3,02E-2$, enquanto que no fim da mesma, os valores são de $-2,65E-2$ a $3,50E-2$. Já no início da chapa 2, os valores variaram de $-1,69E-2$ a $2,98E-2$ e no fim de $-2,55E-2$ a $-3,40E-2$. A dispersão é alta, mas se deve, provavelmente, ao processo de desbobinamento e ao local de retirada

da amostra. Fazendo uma análise de um B_0 geral, para cada bobina os resultados são os apresentados na tabela 9.

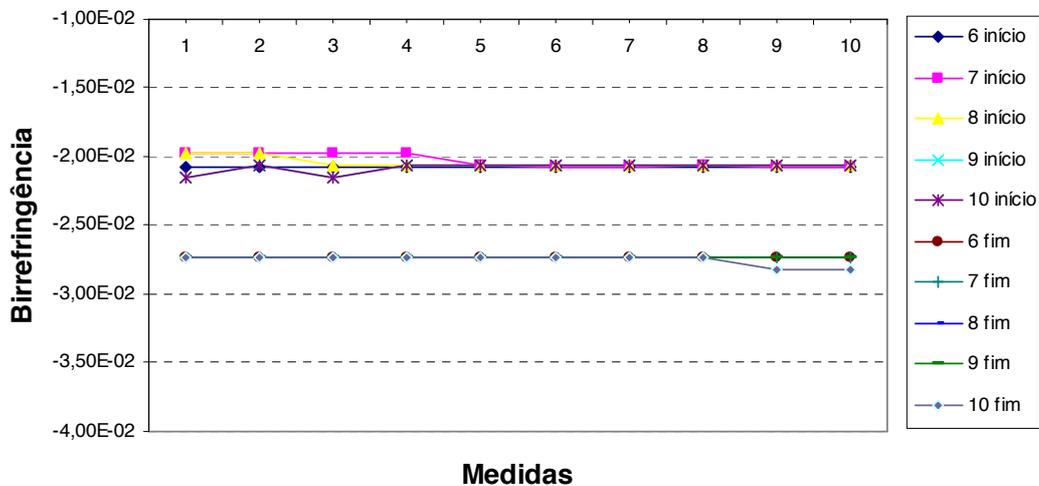
Tabela 9 – Médias de birrefringência de cada chapa.

	<u>Chapa 1</u>		<u>Chapa 2</u>	
	Início	Fim	Início	Fim
média geral	-2,05E-02	-2,87E-02	-2,03E-02	-2,81E-02
média sem extremidades	-1,95E-02	-2,75E-02	-1,95E-02	-2,69E-02

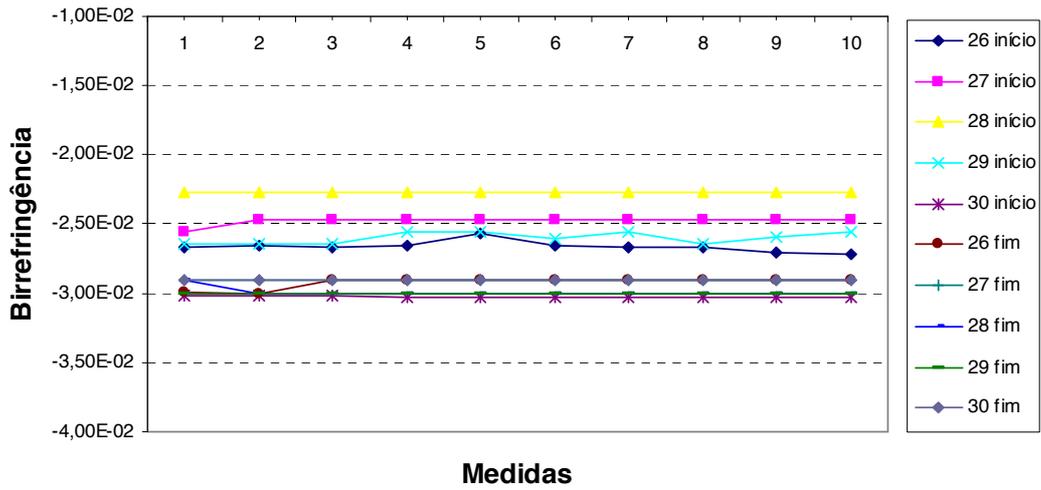
Analisando os dados em cada fileira, figura 50 e 51, e comparando entre início e fim da mesma bobina, confirmamos um aumento de $7,80E-03$ em média para ambos as chapas.



a)



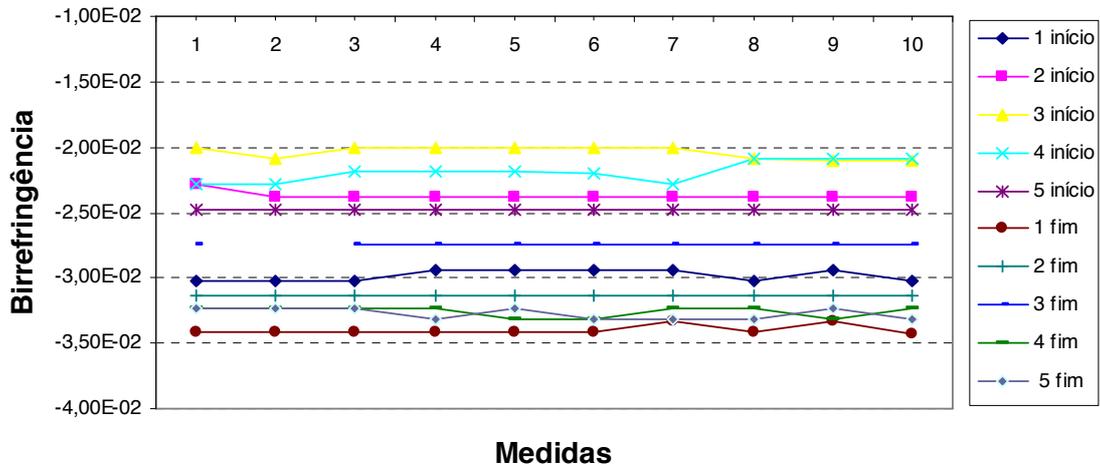
b)



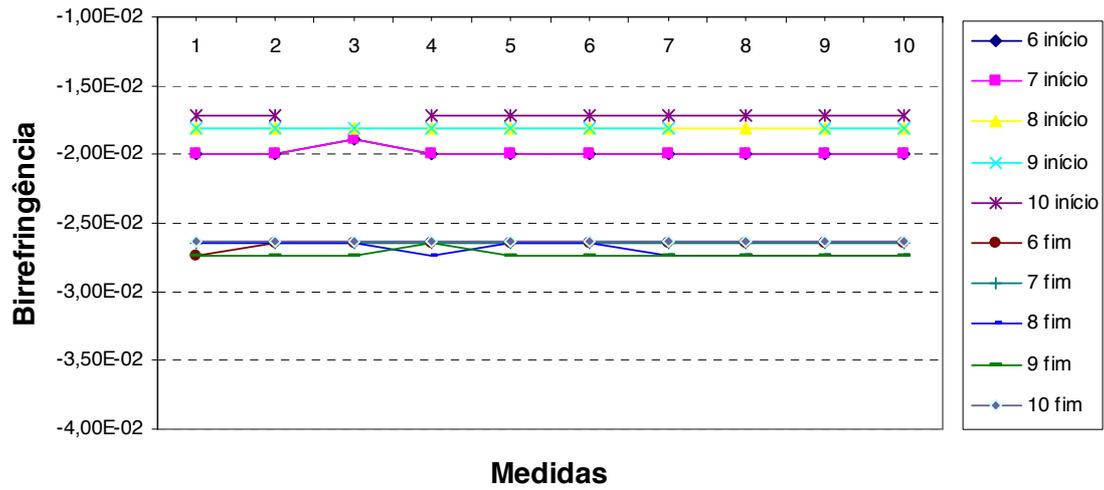
f)

Figura 50 – Comportamento da birrefringência acústica ao longo da chapa 1 (6628):

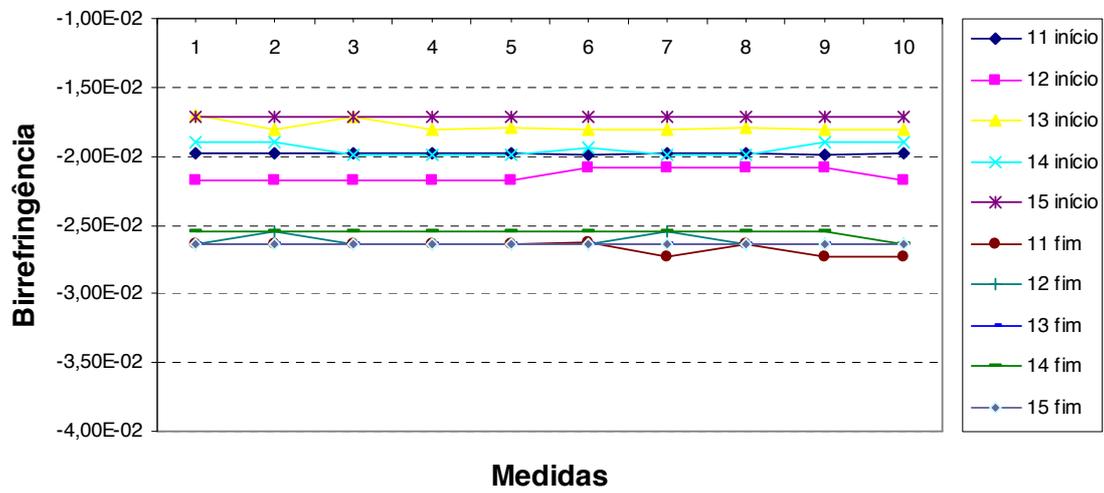
- a) primeira fileira, b) segunda fileira, c) terceira fileira, d) quarta fileira, e) quinta fileira,
f) sexta fileira.



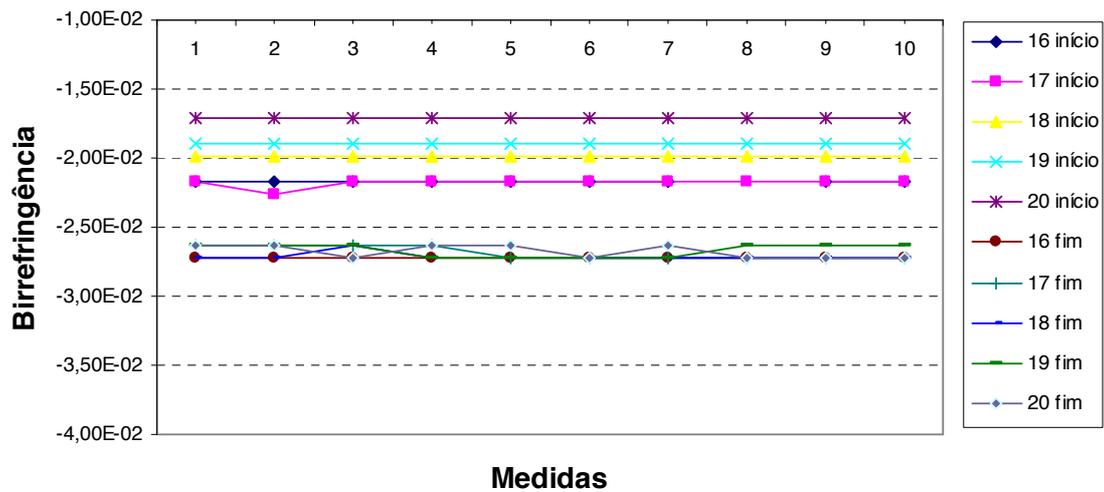
a)



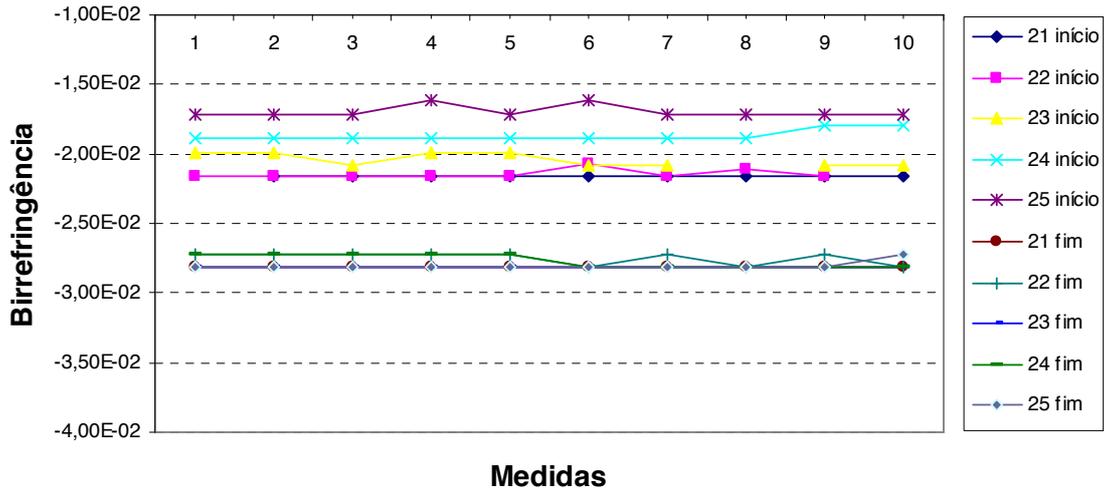
b)



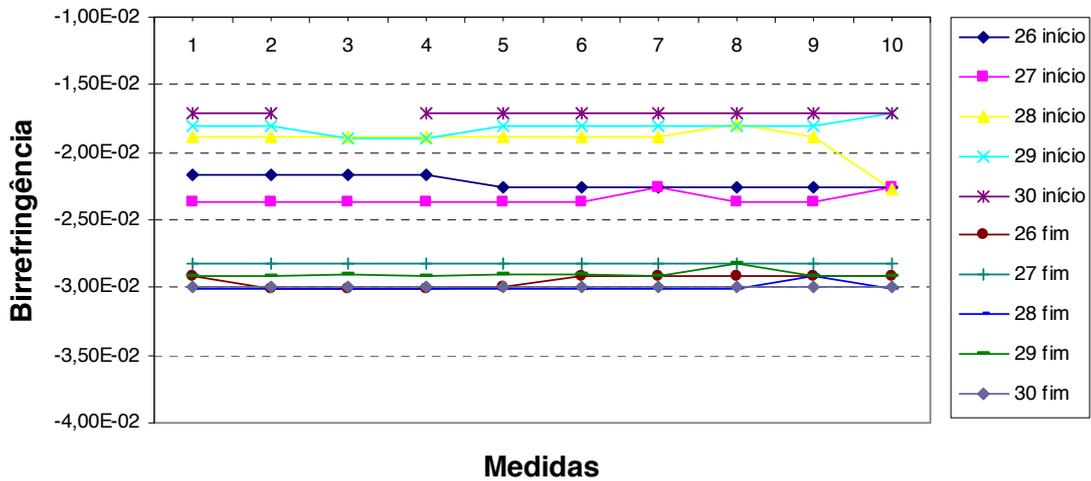
c)



d)



e)



f)

Figura 51 – Comportamento da birrefringência acústica ao longo da chapa 2 (6627):

a) primeira fileira, b) segunda fileira, c) terceira fileira, d) quarta fileira, e) quinta fileira, f) sexta fileira.

Pelos gráficos é possível notar que a birrefringência acústica apresenta um comportamento homogêneo em todos os pontos da fileira, diferindo apenas na fileira 6 e 1, apresentando uma maior dispersão no início da chapa 2. 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.

Então, para avaliar a anisotropia acústica da chapa, foram realizadas análises estatística de regressão múltipla através do programa Statigraf. Esta tabela dá a

correlação de Pearson entre cada variável e variam entre -1 e +1, medindo a força de relação linear entre elas. O Col significa as fileiras da chapa. A figura 52 mostra a regressão da chapa 1.

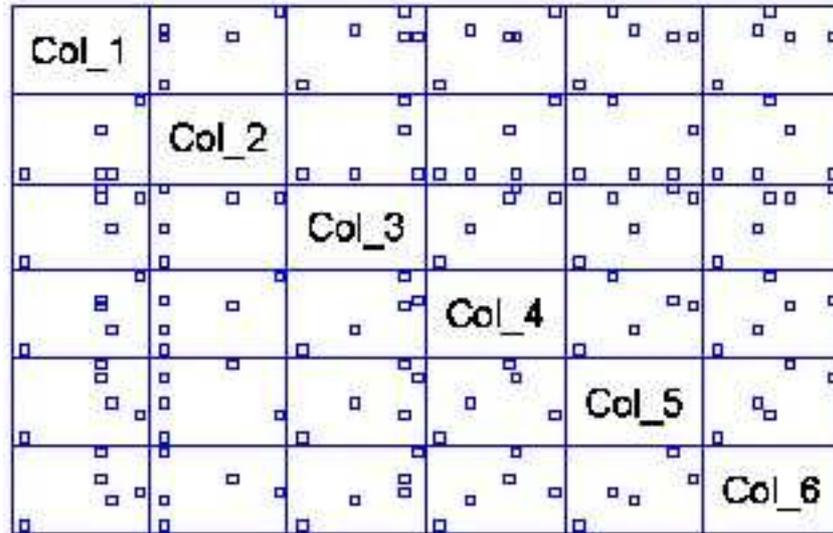


Figura 52 – Análise de regressão da chapa 1.

Com o nível de confiança de 95% e a análise de regressão, os únicos pares de variáveis, dentro deste intervalo, que assumem correlação são as fileiras 3 e 4 e a fileira 3 e 6.

Também foi analisada com o método da variância e o teste de hipótese a birrefringência acústica, o método de variância avaliou a normalidade dos dados de birrefringência e o teste de hipótese, avaliou se a hipótese nula era correta, onde a hipótese nula era dizer que todos os resultados de birrefringência, ao longo da chapa entre seu início e fim, são iguais. Os resultados dos testes estatísticos deram 87,3% de confiança, logo, os resultados não são iguais.

Realizando análise estatística, com o teste de hipótese para médias com 95% de certeza, entre o início e fim das 2 chapas, considerando a variância igual devido a quantidade de dados, os resultados confirmaram a análise feita com a constante acustoelástica, ou seja, entre as chapas 1 e 2, os resultados são iguais, como visto na figura 53.

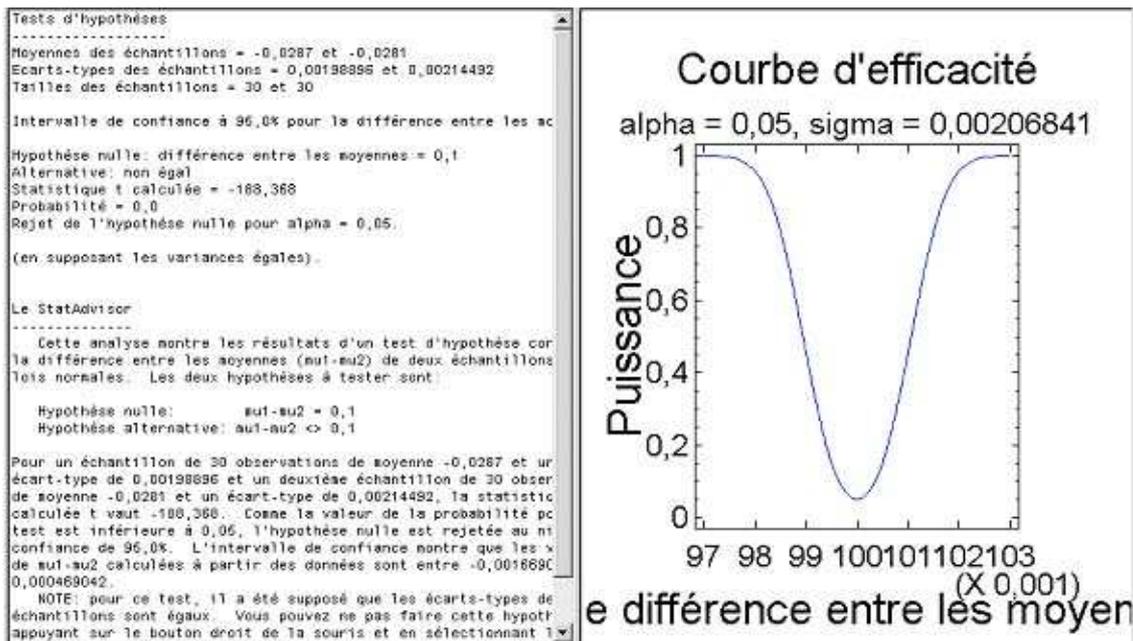


Figura 53 – Curva de hipótese para o fim das bobinas.

A dispersão da birrefringência em cada ponto, pode ter sido influenciada pela rugosidade da chapa, mesmo lixando cada ponto, há variação de espessura de centésimos de milímetros de ponto para ponto, ou a própria pressão de acoplagem imposta pelo operador, ou mesmo ser uma variação normal do processo de laminação e fabricação da chapa, tendo no ponto específico um aglomerado de discordâncias ou inclusões. Verifica-se também como o corte, que é um processo de deformação, influencia no material, pois os maiores valores de birrefringência estão nas bordas da chapa.

4.5. Medição da birrefringência acústica no tubo

Os tubos foram retirados no processo de fabricação, após rebarbamento e antes do tratamento térmico, e marcados como início e fim da bobina. O tubo foi distribuído em 5 seções circunferenciais, a partir da solda contando +12h, +3h, +6h, +9h e -12h, e estendidos em 4 linhas circunferenciais, ao longo do comprimento do tubo, distantes de 10 cm de cada. Foram obtidos 10 valores de birrefringência em cada ponto de cada região.

As medidas começaram na região +12h da solda e estenderam-se ao longo do comprimento do tubo. Após, passou para o +3h, seguindo a linha e assim por diante, como visto na figura 55. O resultado de birrefringência acústica em cada região do tubo,

retirados do início e fim de cada bobina, são apresentados na figura 56, onde foi analisado ao longo do comprimento do tubo, a partir da borda de início de aquisição de dados. As linhas representam as fileiras +12h, +3h, +6h, +9h e -12h. Na figura 57, foram analisados os dados ao longo do diâmetro do tubo e as fileiras correspondem as circunferenciais.

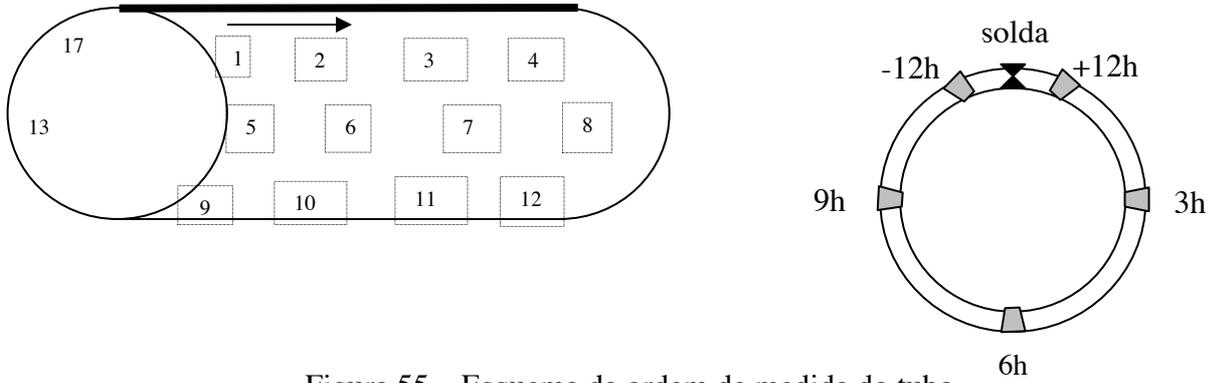
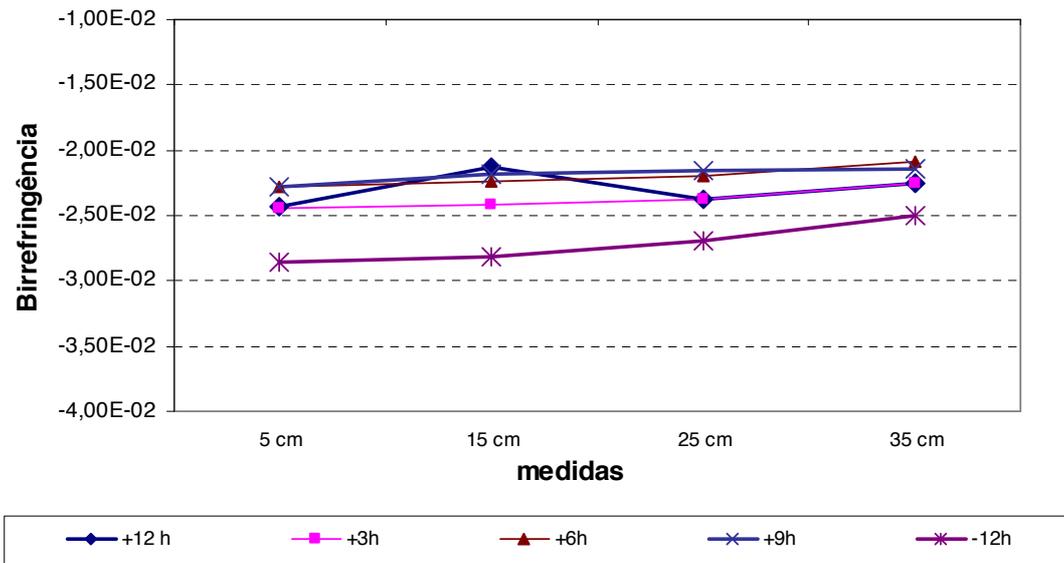
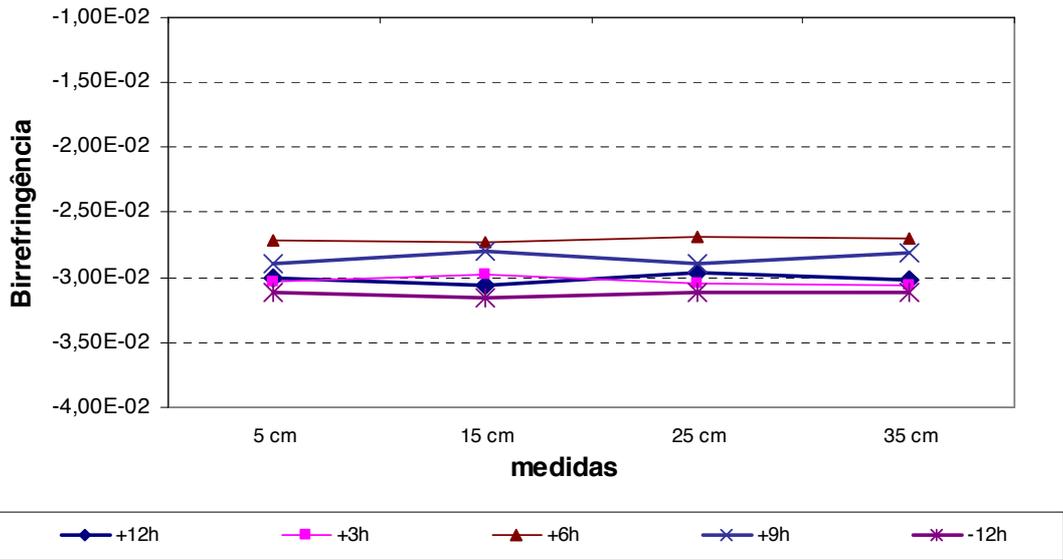


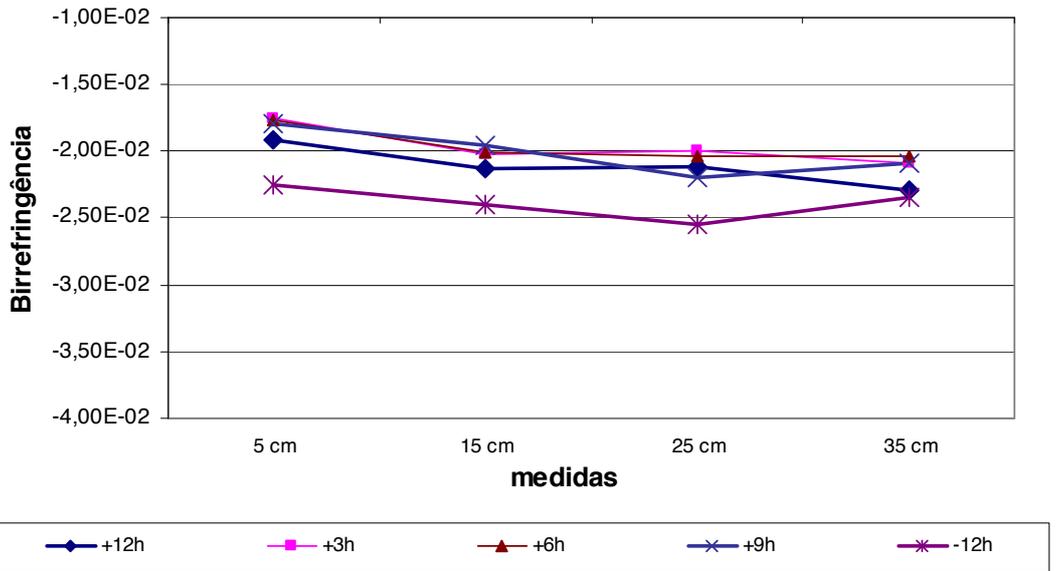
Figura 55 – Esquema da ordem de medida do tubo.



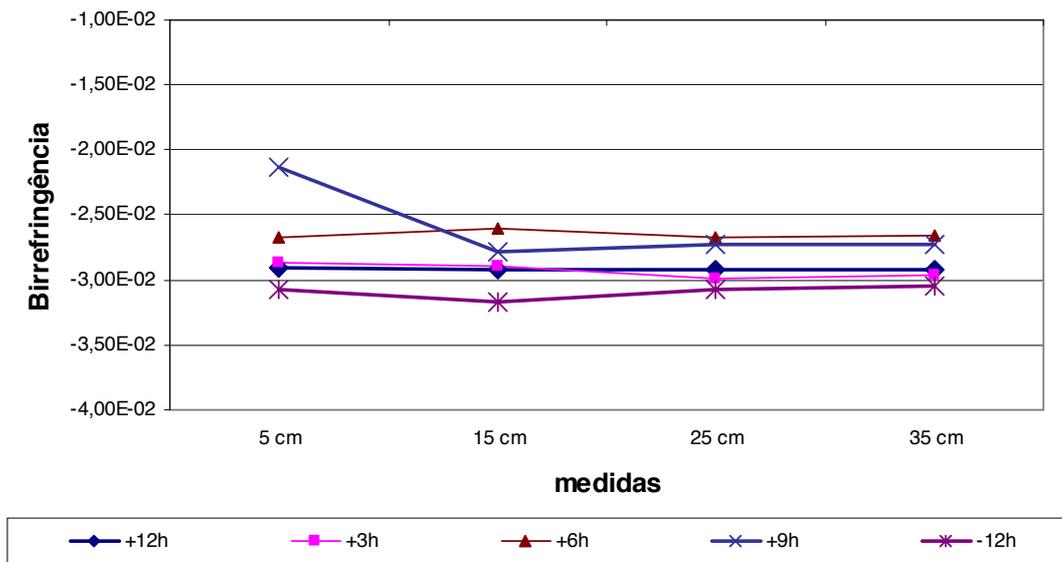
a)



b)



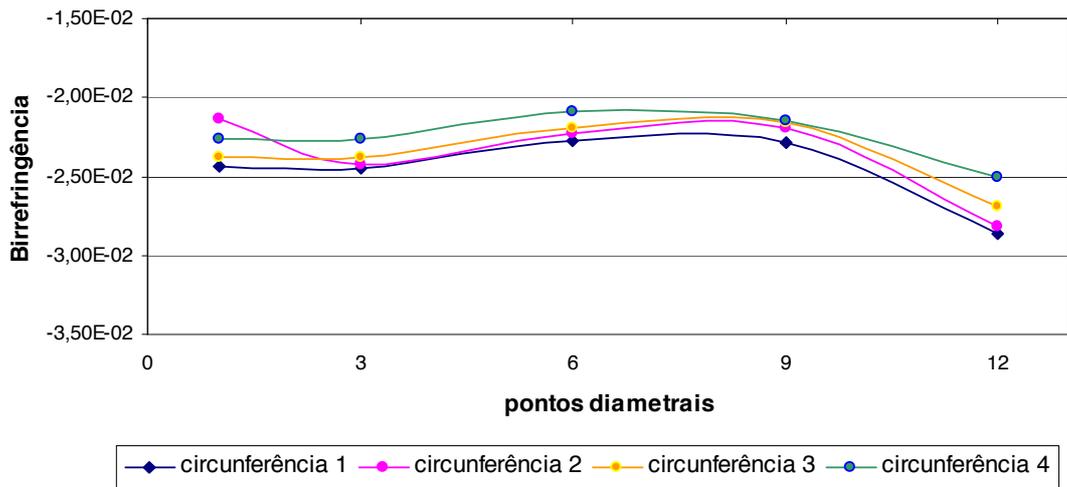
c)



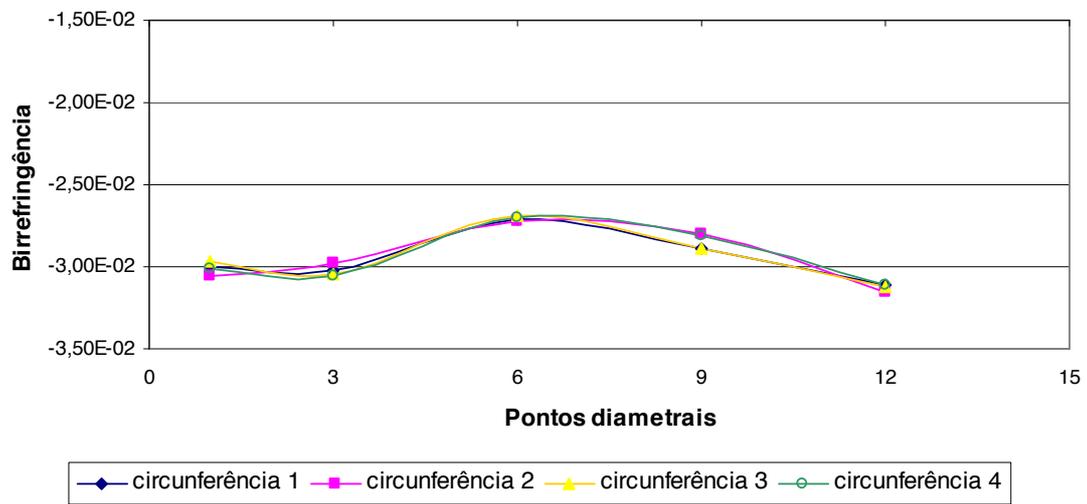
d)

Figura 56 - Comportamento da birrefringência acústica ao longo do comprimento do tubo: a) início bobina 6627, b) fim bobina 6627, c) início bobina 6628, d) bobina 6628.

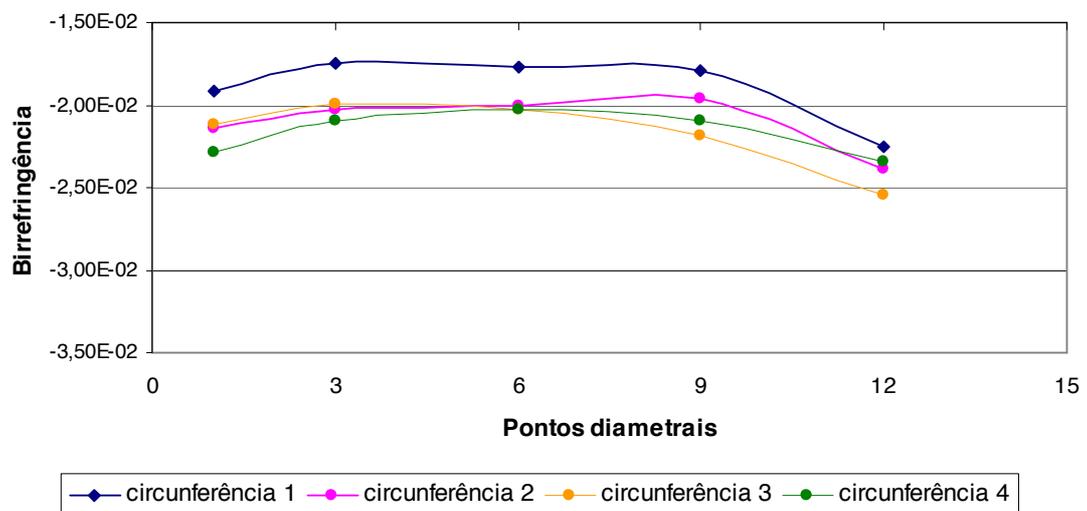
Nota-se que, da mesma forma que na chapa, a primeira e a última fileira (+12 h e -12h) apresentam comportamento diferente das demais, com resultados de birrefringência acústica menor que as outras fileiras. Isto se explica pela proximidade com a área de solda. Os valores apresentaram homogeneidade ao longo da linha, com exceção do início do tubo 1, onde houve alívio ao longo da linha, isto pode ser devido ao comprimento do tubo, sendo este o menor podendo ter sofrido influência do processo de usinagem do tubo para análise. De forma geral, a birrefringência variou entre início e fim de $-1,77 \text{ E-}02$ a $-3,25 \text{ E-}02$, basicamente a mesma variação da chapa. Tendo um aumento com relação à chapa de $5,80\text{E-}03$ no tubo 1, em média, e de $7,60\text{E-}03$ no tubo 2, em média, dos pontos analisados.

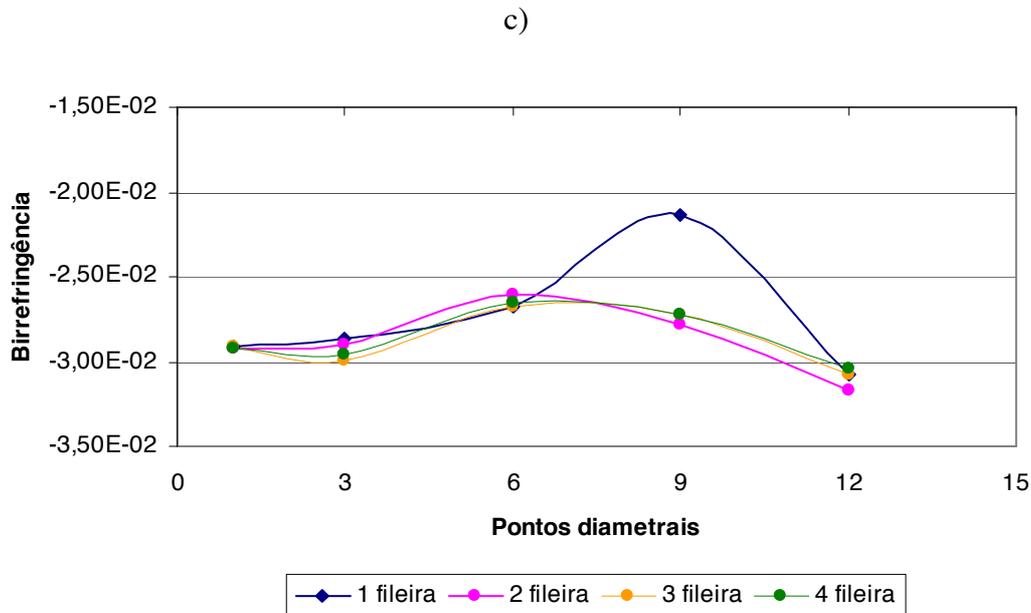


a)



b)





d)

Figura 57 - Comportamento da birrefringência acústica ao longo do diâmetro do tubo: a) início bobina 6627, b) fim bobina 6627, c) início bobina 6628, d) fim bobina 6628.

Verifica-se na figura 57 que, ao longo do diâmetro, os pontos de maior birrefringência são os próximos da solda, confirmando os resultados obtidos ao longo do comprimento do tubo. Os tubos obtêm o mesmo comportamento circunferencial ao longo de seu comprimento, tendo alguns pontos diferentes que podem ser algum defeito de medida. Importante ressaltar que o ponto a +6h, exatamente a 180° da solda é o de menor birrefringência, o valor é o mesmo do meio da chapa. Os valores ao longo da circunferência os tubos variam com uma amplitude de 5,0 E-3, em média.

Porém, esta variação ao longo do diâmetro 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 6, para estes tubos se mostra como uma limitação a ser superada para aplicação da técnica ultra-sônica de medição de tensões em tubos com solda.

Como verificado, a própria chapa de aço laminada também tem variação devido à textura, ou seja, a orientação preferencial dos grãos na direção de laminação da chapa. Uma possível explicação para essa variação é a textura cristalográfica, pois a mesma 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. No processo de fabricação do tubo, 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 soldados representam, na verdade, uma soma dessas três contribuições citadas anteriormente, sendo muito difícil separar a birrefringência referente à presença de tensões residuais no material [37].

A fim de analisar a tensão por este método da birrefringência, utilizou a birrefringência inicial da chapa em cada ponto, a constante acustoelástica média da bobina e a birrefringência do tubo em cada ponto, calculando através da equação 6, os valores podem ser vistos na tabela 11 e na figura 58.

Tabela 11 – Análise de tensão ao longo das medidas do tubo.

	Início tubo 1		Fim tubo 1		Início tubo 2		Fim tubo 2	
	<i>Média</i>	<i>Tensão</i>	<i>Média</i>	<i>Tensão</i>	<i>Média</i>	<i>Tensão</i>	<i>Média</i>	<i>Tensão</i>
1	-2,44E-02	-32,90	-3,00E-02	17,65	-1,92E-02	46,11	-2,91E-02	22,89
2	-2,14E-02	-5,10	-3,06E-02	12,43	-2,14E-02	25,62	-2,93E-02	21,74
3	-2,38E-02	-27,32	-2,96E-02	20,87	-2,11E-02	27,68	-2,92E-02	22,68
4	-2,26E-02	-16,51	-3,01E-02	16,27	-2,29E-02	11,50	-2,92E-02	22,15
5	-2,45E-02	-46,21	-3,03E-02	-25,63	-1,75E-02	18,89	-2,86E-02	-15,95
6	-2,42E-02	-43,63	-2,98E-02	-21,54	-2,03E-02	-7,37	-2,90E-02	-19,44
7	-2,38E-02	-39,48	-3,05E-02	-27,58	-2,00E-02	-4,21	-2,99E-02	-28,32
8	-2,26E-02	-28,50	-3,05E-02	-28,16	-2,09E-02	-13,13	-2,96E-02	-24,95
9	-2,28E-02	-30,42	-2,71E-02	3,85	-1,77E-02	16,63	-2,67E-02	1,58
10	-2,23E-02	-26,16	-2,72E-02	2,65	-2,01E-02	-5,57	-2,61E-02	7,55
11	-2,20E-02	-22,72	-2,69E-02	5,23	-2,03E-02	-7,41	-2,67E-02	1,81
12	-2,08E-02	-12,42	-2,71E-02	4,14	-2,03E-02	-7,41	-2,65E-02	3,40
13	-2,28E-02	-30,91	-2,89E-02	-13,11	-1,79E-02	14,70	-2,14E-02	51,40
14	-2,19E-02	-22,19	-2,80E-02	-4,86	-1,96E-02	-0,57	-2,78E-02	-8,75
15	-2,16E-02	-19,57	-2,89E-02	-12,75	-2,19E-02	-22,44	-2,73E-02	-3,43
16	-2,14E-02	-17,84	-2,81E-02	-5,71	-2,09E-02	-13,24	-2,73E-02	-3,63
17	-2,86E-02	-46,17	-3,11E-02	-14,98	-2,25E-02	-23,14	-3,07E-02	-13,29
18	-2,81E-02	-41,98	-3,15E-02	-18,92	-2,39E-02	-36,64	-3,17E-02	-21,94

19	-2,69E-02	-30,22	-3,12E-02	-15,74	-2,54E-02	-50,64	-3,07E-02	-13,43
20	-2,50E-02	-13,28	-3,12E-02	-15,28	-2,35E-02	-32,43	-3,04E-02	-10,68

Distribuídos conforme figura 58:

12h+	3h+	6h+	9h+	12h-
Início tubo 1				
-32,9	-46,2	-30,4	-30,9	-46,2
-5,1	-43,6	-26,2	-22,2	-42,0
-27,3	-39,5	-22,7	-19,6	-30,2
-16,5	-28,5	-12,4	-17,8	-13,3
Fim tubo 1				
17,6	-25,6	3,9	-13,1	-15,0
12,4	-21,5	2,7	-4,9	-18,9
20,9	-27,6	5,2	-12,8	-15,7
16,3	-28,2	4,1	-5,7	-15,3
Início tubo 2				
46,1	18,9	16,6	14,7	-23,1
25,6	-7,4	-5,6	-0,6	-36,6
27,7	-4,2	-7,4	-22,4	-50,6
11,5	-13,1	-7,4	-13,2	-32,4
Fim tubo 2				
22,9	-15,9	1,6	51,4	-13,3
21,7	-19,4	7,6	-8,7	-21,9
22,7	-28,3	1,8	-3,4	-13,4
22,1	-25,0	3,4	-3,6	-10,7

Figura 58 - Distribuição da tensão ao longo do diâmetro dos tubos (kgf/mm²).

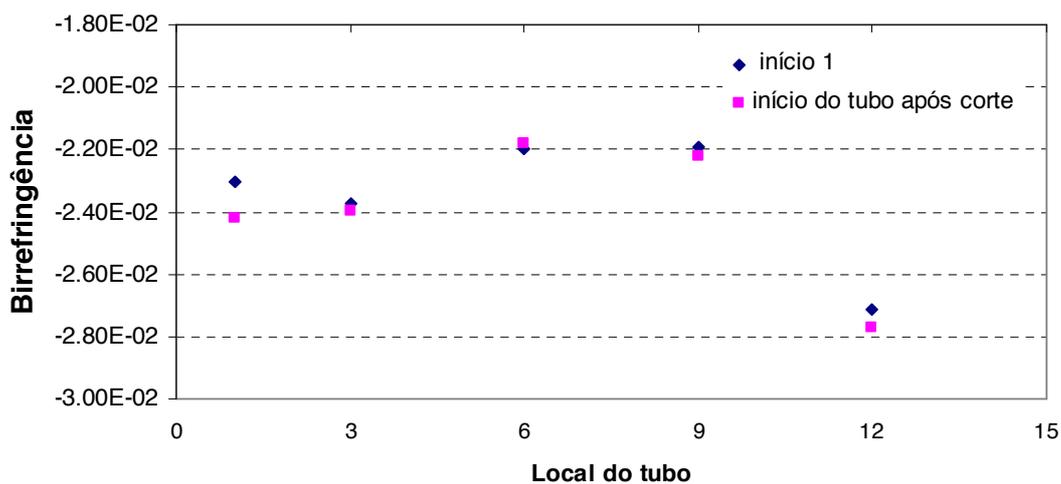
Como se verifica, a tensão no tubo é grande, se comparado ao limite de escoamento, o que já era de se esperar, devido à conformação e a soldagem. As tensões nas bordas da solda também são maiores, chegando a ter alguns pontos acima do limite de escoamento, o que neste caso, se explica pelas deformações impostas por este processo. O nível de tensões no início dos tubos são maiores que nos tubos do final. Tubos 1 (6628) são em média 20 kgf/mm², superiores aos tubos 2 (6627). Se comparados o nível de tensões calculadas com o limite de escoamento esta relação é cerca de 40%.

Para que uma análise qualitativa e comparativa do estado de tensões residuais presentes nos tubos pudesse ser realizado, os tubos foram cortados no local da solda,

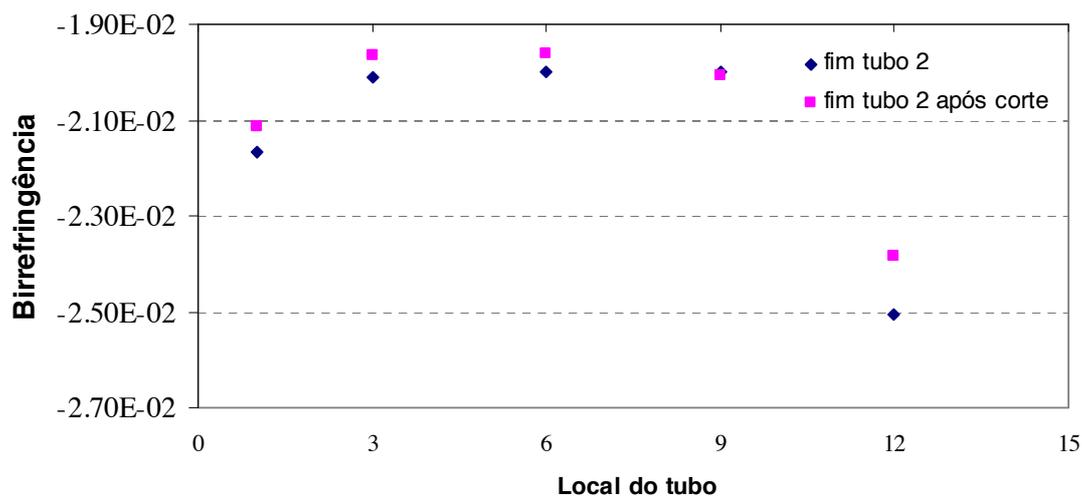
pois conforme literatura, a resposta dos tubos, ao final da etapa de corte, pode ser associada ao estado de tensões residuais presentes, de forma que a abertura do tubo ao final do corte está relacionada a um perfil de tensões residuais trativas, enquanto o fechamento do tubo após o corte é associado a um estado de tensões residuais compressivas [37].

Os cortes para a avaliação do comportamento dos tubos foram realizados por oxi-corte automático. Ao final dos cortes foram medidas as aberturas dos tubos. Os tubos apresentaram um consumo de material referente ao processo de corte de 4mm, sendo que a abertura total variou de 12 a 16 mm no início do tubo 6628 e foi contínuo de 12 mm nos tubos 6627; todos seguidos de barulho referente ao alívio de tensões do material.

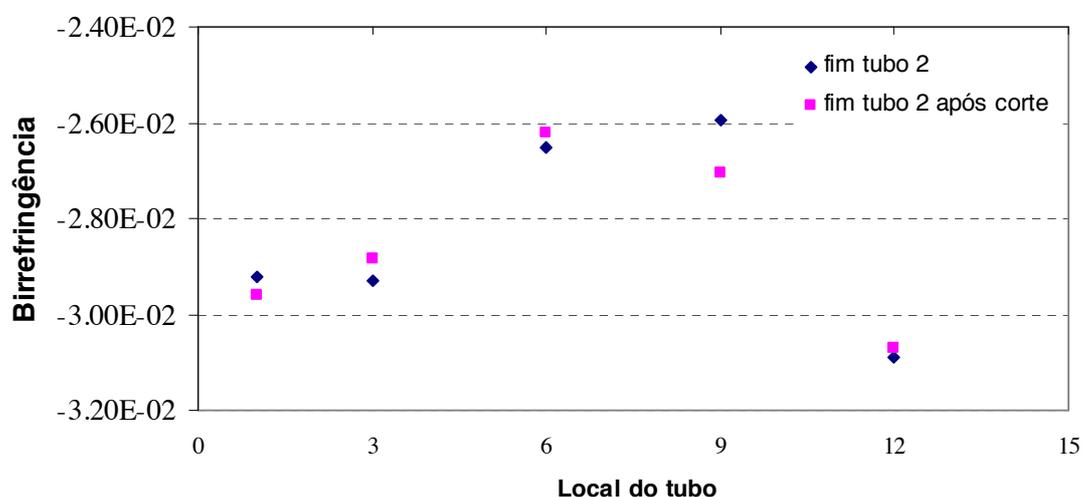
Após os cortes dos tubos, foram feitas medidas de tempo de onda nos mesmos pontos marcados anteriormente, para avaliar o estado de tensões residuais nos tubos, através do comportamento da birrefringência antes e após os cortes dos materiais. O fim do tubo 1 não foi analisado, pois ele apresentava um corte quadrado, a 15 cm da borda. A figura 59 apresenta o comportamento da birrefringência acústica ao longo da seção circular dos tubos, antes e depois do corte realizado.



a)



b)

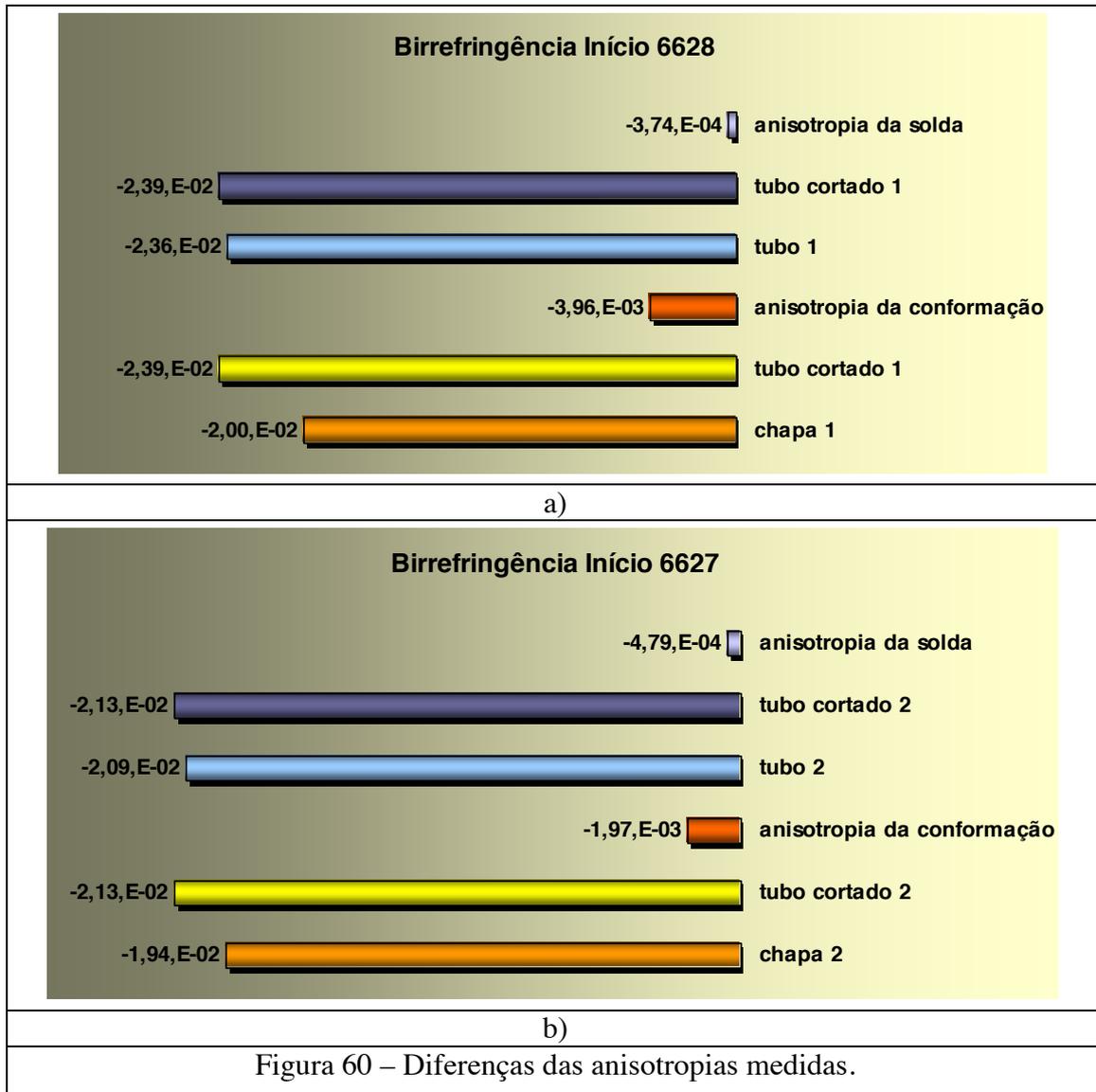


c)

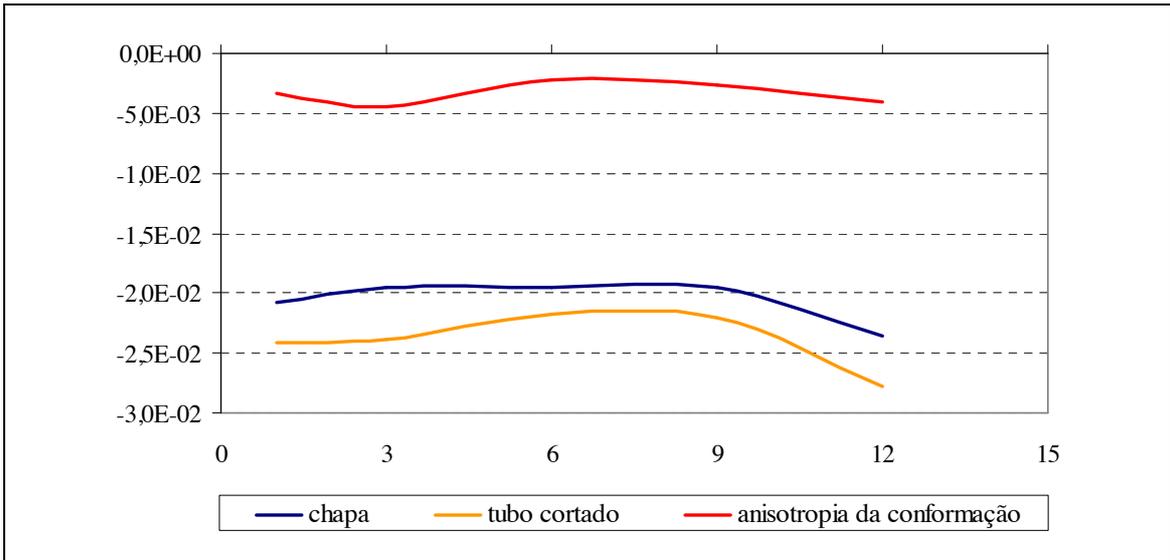
Figura 59 – Comportamento da birrefringência acústica antes e após o alívio de tensão: a) início tubo 1, b) início tubo 2, c) fim tubo 2.

Nota-se um leve alívio de tensão nos tubos, antes e depois do corte, apresentando uma pequena diferença nos valores da birrefringência de $5,5 \text{ E-}4$, no máximo. Os valores do tempo de percurso de onda diminuíram, após o corte, cerca de 9 nanossegundos, sendo que no início dos tubos no sentido transversal houveram as maiores diferenças. Esperavam-se maiores diferenças nas birrefringências em cada ponto próximo ao corte, porém, isto não foi comprovado em todas as amostras estudadas. Apesar do tubo ter sido aliviado, fato comprovado pela própria abertura final do mesmo. Isto pode ser explicado pela operação de alívio de tensão localizada, existente no processo da *Apolo Tubulars*.

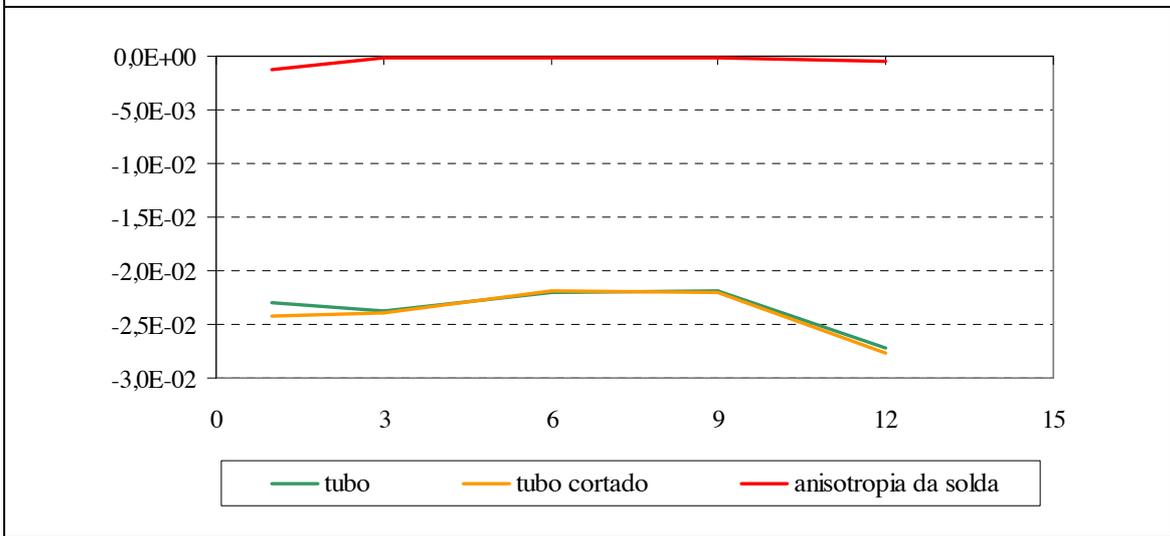
Fazendo a diferença das birrefringências acústicas médias do tubo cortado e da chapa, obtém-se a anisotropia imposta pela conformação do tubo, e à diferença da birrefringência do tubo cortado e o tubo inicial, vê-se a anisotropia imposta pela solda, conforme figura 60.



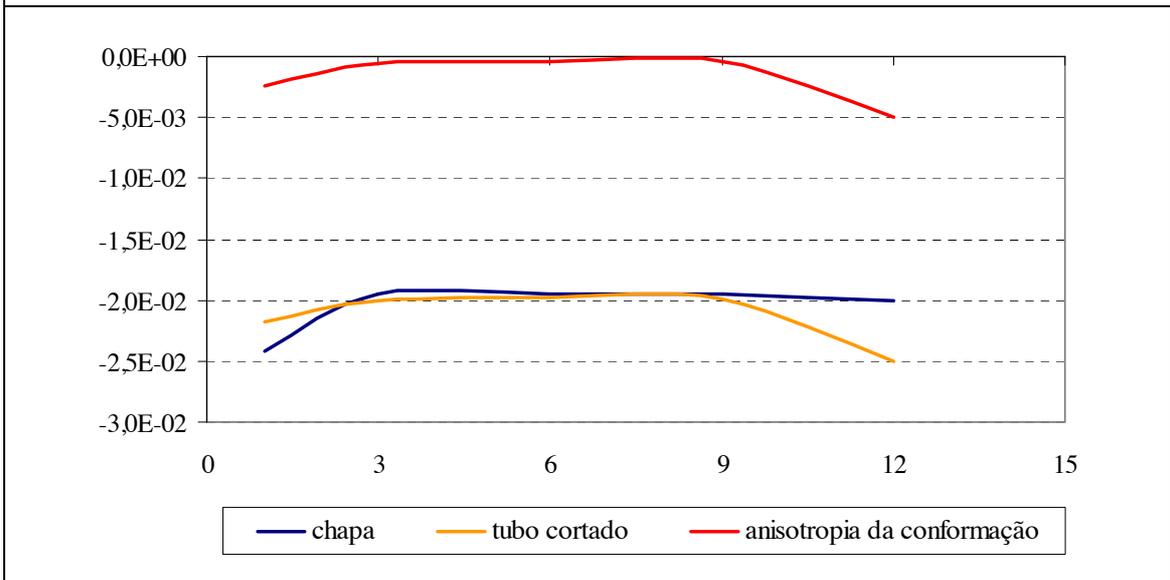
Pela figura, percebe-se que o processo de conformação do tubo é o maior responsável pela anisotropia (tensão/deformação) imposto ao material. A anisotropia (tensão/deformação) referente ao processo de soldagem é menor, mas ainda importante. Um detalhe desta diferença, pode ser percebida na figura 61, onde verifica-se esta anisotropia em cada ponto do tubo.



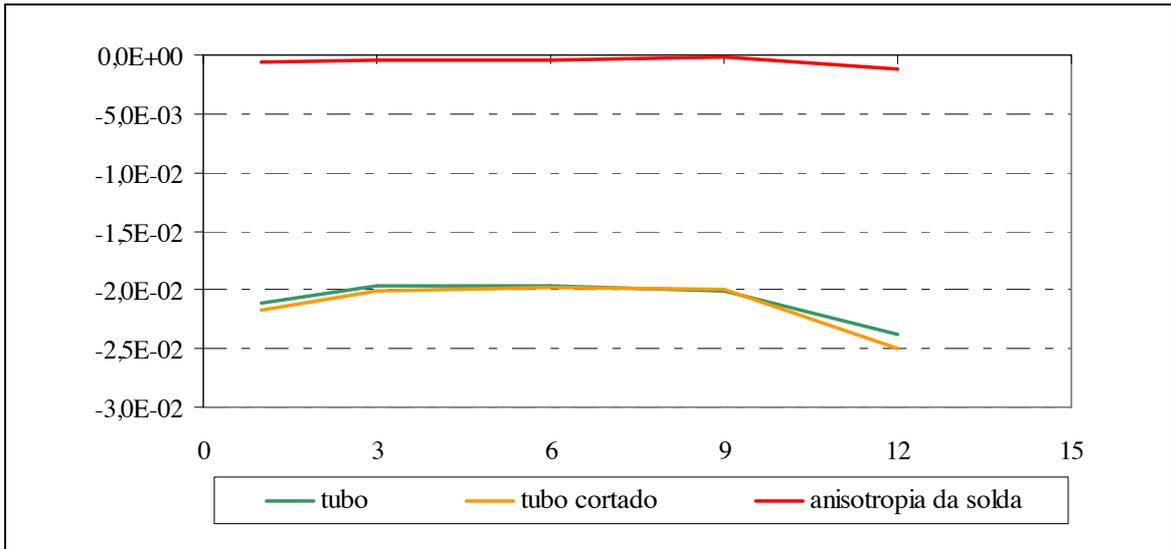
a)



b)



c)

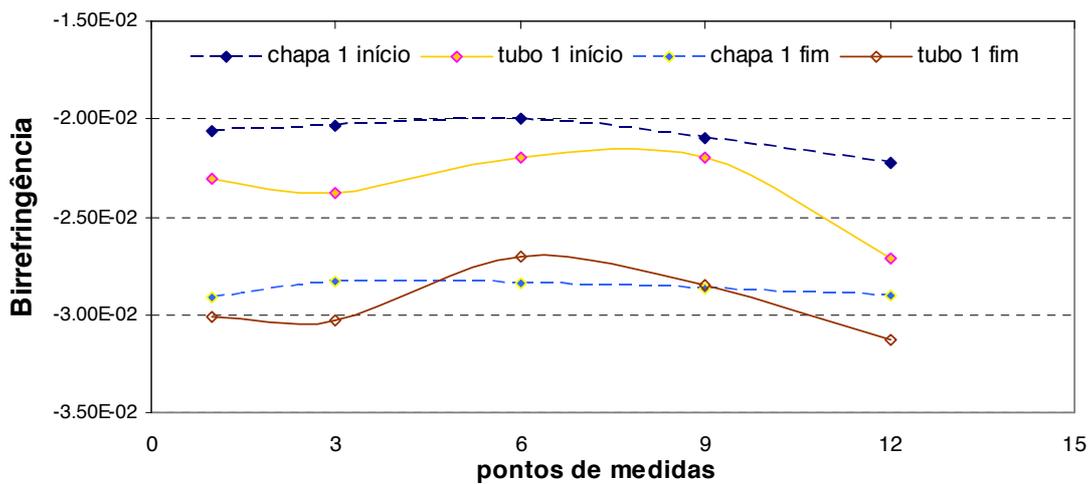


d)

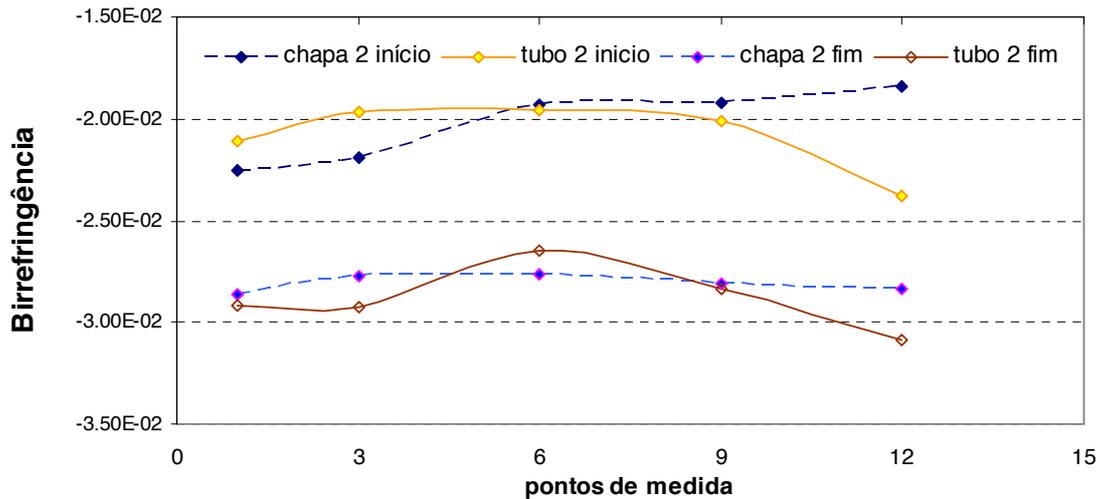
Figura 61 - Distribuição da birrefringência: a) e b) início chapa 6628, c) e d) início chapa 6627.

Verifica-se na figura, exatamente que com o processo de alívio de tensão, somente as bordas da solda sofrem o alívio e também as bordas são as que são mais sujeitas a sofrerem tensões.

A figura 62 apresenta o resultado do comportamento da birrefringência acústica ao longo da largura da chapa e da circunferência do tubo de cada bobina. Os gráficos mostram claramente a diferença do comportamento entre início e fim de bobina.



a)



b)

Figura 62 – Comparação do comportamento da birrefringência acústica entre chapa e tubo: a) bobina 6627, b) bobina 6628.

Os gráficos foram feitos fazendo uma média entre os resultados de birrefringência em cada ponto da chapa ao longo de sua largura, onde é conformada em tubo e ao longo do diâmetro do tubo. Pelo gráfico se verifica que a variação entre a chapa e o tubo estão dentro de uma dispersão pequena e constante, exceto no início do tubo 1 e os pontos 6h e 9h, que nos gráficos são praticamente os mesmos. Pela análise estatística do teste F, comprova-se que os dados não são iguais, exceto o dos pontos 6 e 9 h que não são diferentes. Isto é importante para a perpetuação do método, pois pode-se inferir o valor da birrefringência inicial, tendo somente o tubo para analisar.

A variação que ocorre ao longo do diâmetro do tubo é própria de anisotropia estrutural, característica do processo, mesmo tendo sofrido tratamento térmico. Ela possui propriedades mecânicas diferentes em cada região, o que causa uma anisotropia acústica. A escolha da birrefringência inicial, B_0 , neste caso não é trivial e representa uma limitação da técnica para tubos soldados. Os resultados estão conforme literatura [37].

Percebe-se também, que os valores entre bobina 1 e 2 são similares, para confirmar esta aquisição, utiliza-se do teste estatístico F, comparando o início da bobina com o final da bobina e as 2 bobinas, corroborou com a análise gráfica, comprovando que, entre o início das bobinas ou fim das mesmas, elas não são diferentes e entre início e fim da mesma bobina, não são iguais.

Logo, verifica-se que, ao longo da chapa, os resultados são constantes, e o valor da birrefringência encontrado é devido à orientação dos grãos, característico de estruturas laminadas. No início da bobina 2 pode ter havido um erro de medida no ponto, provavelmente pelo mau estado superficial da chapa, não tendo um bom acoplamento e permitindo uma alta impedância acústica.

4.6 - Considerações finais

As medidas iniciais de birrefringência apontaram para comportamentos acústicos distintos nos tubos. A chapa apresentou uma anisotropia acústica considerável e não homogênea ao longo de sua sessão, principalmente nas extremidades onde houve influência do corte. Os tubos soldados, feitos a partir das mesmas, também apresentaram uma anisotropia acústica maior que a chapa e não homogênea ao longo de sua circunferência, mostrando que cada região do tubo se comporta como um material com características mecânicas distintas entre si, comprovados por análises estatísticas. Como em outros trabalhos publicados, um único valor de birrefringência acústica não representaria de forma segura o comportamento do tubo por inteiro. O ensaio de carregamento mostrou um comportamento distinto entre o início e fim de uma bobina, quando expostas a tração. Nesse caso, as variações nos valores de tensão, ao se escolher um valor inicial de birrefringência, são significativas. Mas pode-se inferir o valor a 180° da solda como o valor da birrefringência acústica inicial, comprovada pela análise estatística. A caracterização microestrutural não apresentou diferenças entre as chapas.

Capítulo 5 – Conclusão e Propostas de estudo

Esta pesquisa teve como objetivo a análise de tensão pela técnica ultra-sônica de tubos de aço API 5L X70, fabricados pelo processo HFIW da *Apolo Tubulars*, utilizados no transporte de óleo e gás. A seguir serão apresentadas as principais conclusões do presente trabalho.

- ✓ Nos tubos da Apolo Tubulars, os valores da birrefringência acústica a 180° da solda (+6h) podem ser considerados como os valores da birrefringência inicial, sendo um ótimo resultado para a perpetuação da técnica ultra-sônica.
- ✓ A constante acustoelástica do material é uniforme entre as bobinas, não importando a posição que se retire o corpo-de-prova.
- ✓ Há influência significativa da birrefringência acústica inicial no cálculo da tensão.
- ✓ A partir dos resultados de birrefringência acústica e dos cálculos estatísticos comprovou o comportamento anisotrópico da chapa, bem como a diferença entre início e fim de cada bobina e o comportamento anisotrópico dos tubos no sentido circunferencial.
- ✓ O nível de tensão nos tubos é pequeno, se comparados ao limite de escoamento do material, exceto nas bordas, para tanto é necessário passá-la pelo processo de alívio de tensão e diminuir a influência da solda na anisotropia acústica do tubo.

Novos estudos podem ser feitos com a amostra do meio da bobina, visando obter uma distribuição acústica uniforme e um valor de birrefringência acústica único, visto ter sido estudado os casos extremos das bobinas, onde se conhece ter maior probabilidade de defeitos internos e terem solicitações diferentes. Pode-se também estudar cada etapa do processo de fabricação, a fim de verificar o local onde se imputa a maior tensão ao material.

6 - Bibliografia

- [1] TRINDADE, V.B. et al. *Produção de Tubos de Aço de Grandes Diâmetros Soldados pelo Processo Arco Submerso Helicoidal (Espiral)*, 61º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2006. Tubos soldados atlântico 2007. Acessado em janeiro de 2008.
- [2] RIBEIRO, Antônio Clélio. *Curso de tubulações industriais*. Faculdade de Engenharia Química de Lorena. 2008.
- [3] ED JUAREZ MENDES TAISS, *O Mercado de Aços de Elevado Valor Agregado, Tendências Tecnológicas e a Estratégia da Usiminas no Atendimento às Demandas*. Workshop: Inovações para Desenvolvimento de Aços de Alto Valor Agregado - Tubos de Alta Resistência para Aplicações Estruturais e Transmissão de Fluídos, 2007.
- [4] PEREIRA, Luiz Carlos. *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.
- [5] SAGE, *Metals Technology*, V10 pag. 224. Junho 1983.
- [6] KEY TO METALS STEEL Disponível em: <<http://www.key-to-steel.com>>. Acessado em: 08 de junho de 2008.
- [7] Informações Técnicas. Disponível em: < <http://www.carneirocarbon.com.br/inftecnicas> >. Acessado em: 08 de junho 2008.
- [8] RATNAPULI, Rajindra Clement. *Considerações metalúrgicas de fabricação de aços para tubos API 5L*. 62º Congresso anual da ABM. 2007.

- [9] GORNI, Antônio Augusto; MEI, Paulo Roberto. *Efeito dos parâmetros da laminação controlada sobre a precipitação do cobre em aço HSLA-80*. 61º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2006.
- [10] BARBOSA, R. *Simulações Laboratoriais de Processos de Conformação Industriais*. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG., 2007.
- [11] GORNI, Antônio Augusto, SILVEIRA, José Herbert Dolabella. *Interação entre as demandas das aplicações e as características e especificações de chapas grossas*. 60º Congresso da ABM, Belo Horizonte, 2005.
- [12] NUNEZ, Milagros Mabel Guillén. *Avaliação do comportamento em corrosão dos aços API 5L X70 e API 5L X80 em meio contendo CO2 por técnicas de análises superficiais e eletroquímicas*. Mestrado Puc-Rio, 2006.
- [13] MORAIS, Willy Rank. *Particularidades da produção e desenvolvimento de aços planos ao carbono e microligados e o contexto na terminologia siderúrgica*. Instituto Brasileiro de Siderurgia IBS.
- [14] API 5L. *Specification for line pipe*. 2000
- [15] SEBASTIÃO, Carlos Roberto. *Caldeiraria, Tubulações Industriais*. Senai e CST. 1997.
- [16] TEBECHERANI, Ciro de Toledo Piza. *Noções básicas sobre tubos de aço carbono com costura*. Disponível em: <http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Tubos_Aco>. Acessado em: 16 de junho de 2008.
- [17] STANLEY et BRAY, Roeric K., Dom E., *Nondestructive Evaluation*, 217pag, 1996.
- [18] TENARESCONFAB. *Tubos para condução (Line Pipe)*. 2006

- [19] Processo de produção APOLLO Tubulars. 2007
- [20] API St. 1104. *Welding of Pipelines and Related Facilities - 20th Edition, 2008 American Petroleum Institute.*
- [21] ALMEIDA,C.O.C. et all. *Estudo do processo de fabricação de tubos de aço com costura. 8º Congresso Americano de Ingenieria Mecânica. 2007.*
- [22] STAR TECNOLOGIA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Disponível em: <<http://www.startecnologia.com.br>>. Acessado em: 17 de janeiro de 2007.
- [23] JAMES,Michael; LU,Jian; ROY, George. *Handbook of mesasurement of residual stressses.*Pag 223,1996.
- [24] ANDREUCCI, Ricardo. *Ensaio por ultra-som.* Abende 2006.
- [25] VENTRELLA, Vicente Afonso. *Tenacidade ao impacto do metal de solda do aço API X70 soldado com arame tubular AWS E-81T1-Ni1. 29º Congresso Nacional de Soldagem. 2003.*
- [26] ORDONEZ, R.E.C.; SILVA, J.H.F; TREVISAN, R.E. Estudo do comportamento das micro e macrodureza de juntas de aço API 5L X80 soldadas com arame tubular.III CONEM Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém, 2004.
- [27] MODENESI,Paulo J.; *Efeitos mecânicos.* Belo Horizonte, 2001.
- [28] BITTENCOURT, M.S.Q. et al.. *Medidas de tempo de percurso da onda ultrassônica para avaliação de tensões.* In.: III Conferência pan americana de ensaios não destrutivos (PANNDT), Rio de Janeiro, 2003.
- [29] ANDRINO, M.H. et al. *Aplicação da acustoelasticidade para avaliação de tensões em solda em aço API 5L X65.* III Pan American Conference for nondestructive Testing, 2003.

- [30] ORTEGA, Linton Patrício et al. *Obtenção de constantes elásticas por ultra-som em meios isotrópicos e levemente ortotrópicos*. III Pan American Conference for nondestructive Testing, 2003.
- [31] MEDEIROS, R.C. et al. *Avaliação por ultra-som das tensões impostas em tubo API X 65*. Rio Pipeline Conference, 2003.
- [32] CARMOS, D.C., BITTENCOURT, M.S.Q., PAYAO, J.C., *Avaliação por ultra-som das tensões impostas por flexão em uma barra de aço*. 61º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2006.
- [33] BITTENCOURT, M.S.Q., et al. *Estudo acustoelástico de tubos o aço API 5L X70 com costura*. Rio Oil e Gás Expo e Conference Rio de Janeiro 2006.
- [34] MATOS, A.O. et al. *Avaliação de tensões internas por ultra-som usando a técnica da birrefringência acústica*. International Nuclear Atlantic Conference Santos 2005.
- [35] ANDREUCCI, Ricardo. *A Radiologia industrial*. Abende 2003.
- [36] BITTENCOURT, M.S.Q., FONSECA, M.A.C., OLIVEIRA, C.H.F. *Determinação da constante acustoelástica de tubos API 5L X70 com solda*. Rio Oil e Gás Expo Conference, 2008.
- [37] CARDOSO, Bruno Reis. *Avaliação da acustoelasticidade em tubos de aço API X46 com e sem costura visando o estudo do estado de tensões*. Mestrado UFRJ. 2007.
- [38] MORDFIN, Leonard. *Mechanical relaxation of residual stresses*. Pág 117, 1988.
- [39] ZACARIAS, Richard. *Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas da soldagem circunferencial do aço API 5L X80 por processos de soldagem semi-automáticos com proteção gasosa*. Dissertação de mestrado Puc- Rio 2007.

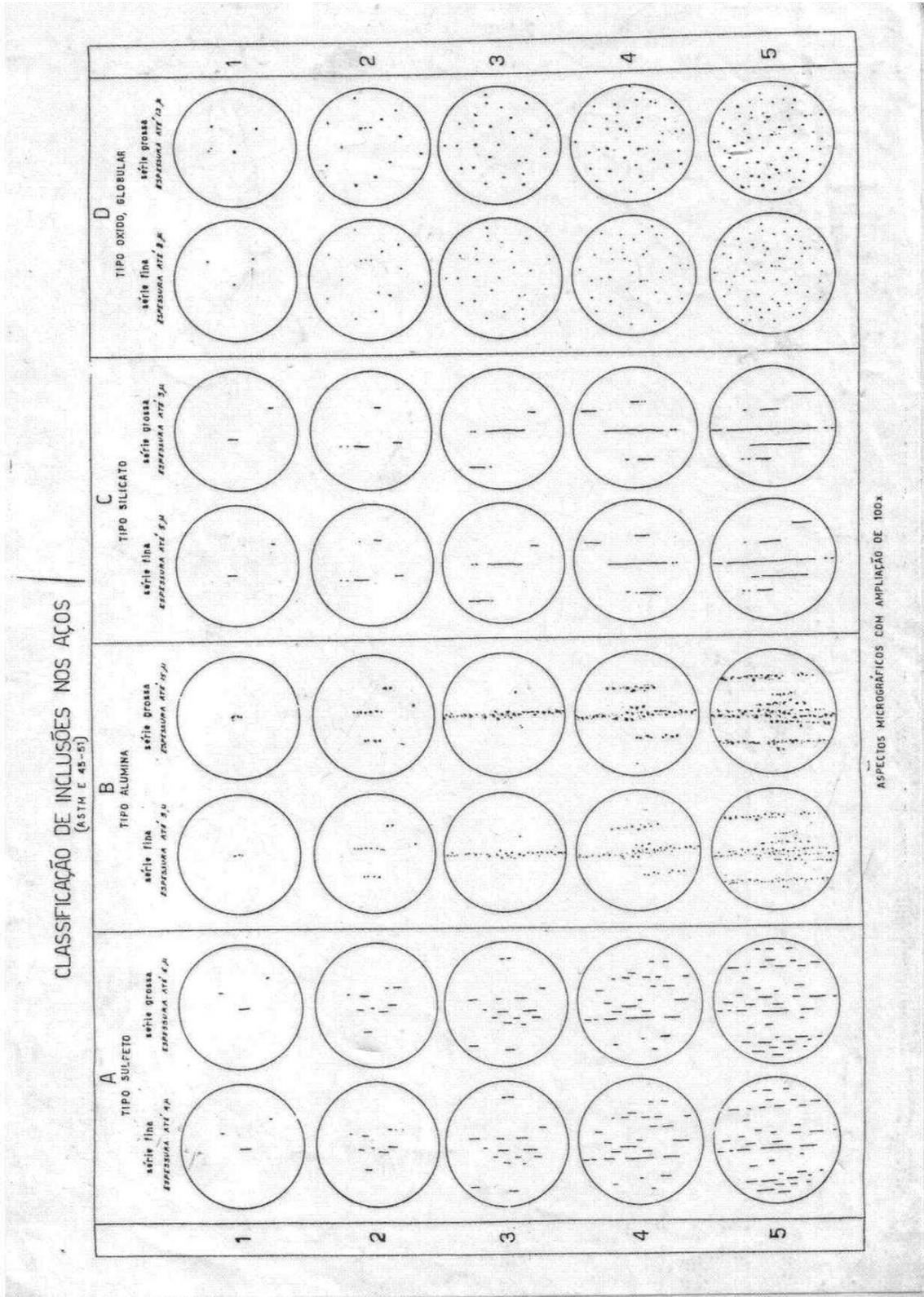
- [40] PERCY, Marco Antonio S. Pinto. *Soldagem circunferencial de tubo API 5L X80 empregando processo manual semi automático*. Dissertação de mestrado Puc - Rio, 2006.
- [41] YOUKI, M. et al. *Acoustoelasticity effect of ultrasonic wave in composite materials*. Journal Title; Nippon Kikai Gakkai Kansai Shibu Teiji Sokai Koenkai Koen Ronbunshu 2003.
- [42] SANTOS, A. et al. *Application of acoustoelasticity to evaluate stress relaxation in API 5L X70 steel for pipelines*. Materials Evaluation, Maio 2005.
- [43] CAETANO, Sidney Felix. *Determinação das constantes acustoelásticas para aços API 5L X70 para gasodutos*. Dissertação mestrado da Unicamp, abril 2003.
- [44] ANDRINO, Marcílio Haddad. *Avaliação de tensões residuais em soldas de dutos, utilizando o efeito acustoelástico*. Dissertação de mestrado da Unicamp, abril 2003.
- [45] MINICUCCI, Domingues José. *Avaliação de tensões por ultra-som no aro de rodas Ferro – várias forjadas – nível classe C*. Dissertação de mestrado da Unicamp, setembro 2003.
- [46] ASTM E 112-96. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. 2004.
- [47] ZEEMANN, Annelise. *Produtos Tubulares*. TECMETAL, 2006.
- [48] CARMO, D.C. et al. *Identificação por ultra-som das regiões de tensões trativas e compressivas numa barra fletida*. Tecnologia em metalurgia e materiais, São Paulo, 2007.
- [49] AMAURI, G; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A.. *Ensaio dos materiais*. Rio de Janeiro. LTC – Livros técnicos e científicos Editora S.A. 2000.

[50] MIYAURA, Edson Haruo, SANTOS, Auteliano Antunes. *Avaliação não destrutiva de tensões em dutos utilizando acustoelasticidade..* 60º Reunião Anual SBPC.

[51] DAVIS, J.R. *Metals Handbook* – 2ª edição, dezembro 1998.

7 - Anexo I

Formulário para classificação de inclusões, segundo ASTM E 45-51.



8 - Anexo II

Tabela 12 – Erro padrão de medida de cada ponto nas chapas.

<u><i>Início chapa 1</i></u>		<u><i>Fim chapa 1</i></u>		<u><i>Início chapa 2</i></u>		<u><i>Fim chapa 2</i></u>	
Ponto	Erro padrão	Ponto	Erro padrão	Ponto	Erro padrão	Ponto	Erro padrão
1	9,50E-05	1	2,40E-10	1	1,50E-04	1	1,25E-04
2	1,49E-04	2	9,46E-05	2	9,19E-05	2	1,96E-10
3	0,00E+00	3	9,13E-05	3	1,48E-04	3	0,00E+00
4	0,00E+00	4	1,30E-04	4	2,45E-04	4	1,37E-04
5	9,82E-11	5	1,61E-04	5	9,82E-11	5	1,56E-04
6	6,37E-06	6	1,70E-10	6	9,56E-05	6	9,31E-05
7	1,53E-04	7	5,17E-06	7	9,56E-05	7	1,39E-10
8	1,27E-04	8	7,04E-06	8	5,34E-06	8	1,55E-04
9	1,19E-04	9	9,82E-11	9	1,34E-10	9	9,16E-05
10	1,19E-04	10	1,18E-04	10	7,76E-11	10	1,39E-10
11	1,46E-04	11	5,39E-05	11	5,30E-06	11	1,39E-04
12	5,88E-05	12	0,00E+00	12	1,48E-04	12	1,27E-04
13	9,29E-05	13	5,29E-06	13	1,24E-04	13	3,87E-06
14	1,41E-04	14	0,00E+00	14	1,42E-04	14	9,29E-05
15	1,55E-04	15	1,50E-04	15	6,13E-06	15	1,96E-10
16	1,66E-04	16	1,96E-10	16	0,00E+00	16	0,00E+00
17	1,49E-04	17	1,24E-04	17	8,88E-05	17	1,56E-04
18	0,00E+00	18	8,80E-05	18	0,00E+00	18	1,03E-04
19	1,50E-04	19	1,20E-04	19	5,22E-06	19	1,55E-04
20	6,04E-06	20	1,96E-10	20	0,00E+00	20	1,53E-04
21	1,21E-04	21	1,47E-04	21	0,00E+00	21	1,39E-10
22	1,43E-04	22	1,38E-04	22	1,17E-04	22	1,41E-04
23	5,19E-05	23	4,73E-05	23	1,66E-04	23	1,39E-10
24	0,00E+00	24	1,39E-04	24	1,24E-04	24	1,56E-04
25	6,06E-05	25	1,39E-10	25	1,27E-04	25	9,10E-05
26	1,23E-04	26	1,20E-04	26	1,55E-04	26	1,49E-04
27	9,37E-05	27	3,85E-06	27	1,27E-04	27	1,39E-10
28	3,99E-06	28	9,53E-05	28	4,02E-04	28	8,68E-05
29	1,34E-04	29	6,29E-06	29	1,70E-04	29	9,15E-05
30	6,10E-06	30	5,21E-06	30	0,00E+00	30	3,85E-06

Tabela 13 – Erro padrão de medida de cada ponto dos tubos.

<u>Tubo início 1</u>		<u>Tubo fim 1</u>		<u>Tubo início 2</u>		<u>Tubo fim 2</u>	
Ponto	Erro padrão	Ponto	Erro padrão	Ponto	Erro padrão	Ponto	Erro padrão
1	1,38E-04	1	2,63E-04	1	2,71E-04	1	0,00E+00
2	1,21E-04	2	1,49E-04	2	1,21E-04	2	1,64E-04
3	1,38E-04	3	1,51E-04	3	0,00E+00	3	6,79E-06
4	1,41E-04	4	9,03E-05	4	1,37E-04	4	0,00E+00
5	2,06E-04	5	1,39E-04	5	1,86E-04	5	0,00E+00
6	1,22E-04	6	2,31E-04	6	2,32E-04	6	1,53E-04
7	2,77E-04	7	9,13E-05	7	1,51E-04	7	1,49E-04
8	1,52E-04	8	1,96E-10	8	1,51E-04	8	1,38E-04
9	1,53E-04	9	9,44E-05	9	1,20E-10	9	1,38E-04
10	0,00E+00	10	1,86E-04	10	1,54E-04	10	9,16E-05
11	1,52E-04	11	2,18E-04	11	1,43E-04	11	1,22E-04
12	1,54E-04	12	1,66E-04	12	1,43E-04	12	1,53E-04
13	1,57E-04	13	9,16E-05	13	1,87E-04	13	5,38E-03
14	1,57E-04	14	9,18E-05	14	9,27E-05	14	9,44E-05
15	1,26E-04	15	0,00E+00	15	1,53E-04	15	1,58E-04
16	2,00E-06	16	1,22E-04	16	2,45E-04	16	1,40E-04
17	2,16E-04	17	1,38E-04	17	1,43E-04	17	2,89E-04
18	1,68E-04	18	9,10E-05	18	1,25E-04	18	1,55E-04
19	0,00E+00	19	1,44E-04	19	1,54E-04	19	0,00E+00
20	0,00E+00	20	1,39E-04	20	2,82E-04	20	1,99E-04

Tabela 14 – Erro padrão de medida de cada ponto dos tubos após alívio de tensões.

<u>Tubo início 1 após alívio</u>		<u>Tubo início 2 após alívio</u>		<u>Tubo fim 2 após alívio</u>	
Ponto	Erro padrão	Ponto	Erro padrão	Ponto	Erro padrão
1	1,18E-04	1	1,48E-04	1	2,54E-04
2	3,71E-06	2	1,39E-04	2	9,33E-06
3	2,81E-04	3	1,78E-04	3	1,30E-04
4	1,50E-04	4	1,40E-04	4	1,25E-04
5	1,94E-04	5	1,65E-04	5	1,53E-04
6	2,16E-04	6	1,65E-04	6	1,95E-04
7	1,53E-04	7	2,48E-04	7	1,94E-04
8	3,15E-04	8	1,40E-04	8	1,81E-04
9	1,64E-04	9	7,81E-06	9	1,33E-04
10	1,37E-04	10	9,61E-05	10	1,32E-04
11	1,24E-04	11	2,06E-04	11	7,82E-06
12	2,26E-04	12	9,33E-05	12	1,28E-04
13	1,38E-04	13	1,68E-04	13	1,00E-05
14	1,57E-04	14	1,96E-04	14	1,03E-05
15	1,27E-04	15	1,65E-04	15	1,42E-05
16	2,05E-04	16	2,19E-04	16	1,53E-04
17	1,61E-04	17	2,07E-04	17	2,32E-04
18	1,54E-04	18	2,82E-04	18	8,48E-05
19	1,26E-04	19	3,93E-06	19	1,31E-05
20	1,35E-04	20	1,67E-04	20	1,41E-04