



AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DE TUBOS OCTG DO TIPO CASING API 5CT  
GRAU N80Q SOLDADOS COM O PROCESSO ERW/HFIW

Manoel Antonio da Costa Fonseca

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: João da Cruz Payão Filho

Rio de Janeiro  
Março de 2012

AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DE TUBOS OCTG DO TIPO CASING API 5CT  
GRAU N80Q SOLDADOS COM O PROCESSO ERW/HFIW

Manoel Antonio da Costa Fonseca

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.

Examinada por:

---

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

---

Prof<sup>a</sup>. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

---

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

---

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
MARÇO DE 2012

Fonseca, Manoel Antonio da Costa

Avaliação acustoelástica de tubos OCTG do tipo casing API 5CT Grau N80Q soldados com o processo ERW/HFIW/ Manoel Antonio da Costa Fonseca. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XVI, 118 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 113-118.

1. Birrefringência acústica. 2. Tensão residual. I. Payão Filho, João da Cruz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

*À minha esposa Lucinda, às minhas filhas Danielle e Michelle e à minha família.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha mãe (in memoriam) e ao meu pai que sempre me incentivaram no estudo.

À minha querida esposa Lucinda, às minhas filhas Danielle e Michelle e à toda família pelo apoio e incentivo em todos os momentos durante o Curso de Mestrado.

À COPPE/UFRJ, ao IEN/CNEN e à APOLO TUBULARS pelo apoio.

Ao meu orientador Prof. João da Cruz Payão Filho, pela sua atenção e orientação em todos os momentos necessários.

Ao Doutor Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt pelo apoio, incentivo e orientação durante o curso de Mestrado.

Aos Doutores do IEN/CNEN, Carlos Alfredo Lamy, Jorge Gomes, Ronaldo Correa e aos Mestres José Carlos de Almeida e Elizabeth Eugênio, pelas contribuições dadas durante a realização do estudo e pelo incentivo.

Ao Técnico do IEN/CNEN Antonio Geraldo, pela sua inesquecível contribuição na execução dos ensaios ultrassônicos, na preparação de todas as amostras e por suas constantes palavras de incentivo.

Aos Técnicos do IEN/CNEN Daniel Martorelli, Paulo Ramos, Márcia Maria, José Marciano, e ao bolsista Douglas Barone, pelo apoio e pelo permanente incentivo dado durante o curso.

Ao Vice-presidente da APOLO TUBULARS, Dr. Wilson Rosa, e ao Gerente Industrial, Eng. Luís Melo, por acreditarem e incentivarem a pesquisa científica e tecnológica.

Aos Supervisores da APOLO TUBULARS André Caldas e Eng. Luís Boni, e aos Técnicos Álvaro Silva e Márcio Oliveira pelo apoio nas instalações laboratoriais e nas etapas de fabricação selecionadas para estudo.

A todos os colegas do IEN/CNEN.

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

AValiação Acustoelástica de Tubos OCTG do Tipo Casing API 5CT  
Grau N80Q Soldados com o Processo ERW/HFIW

Manoel Antonio da Costa Fonseca

Março/2012

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Este trabalho apresenta uma avaliação acustoelástica em seis tubos OCTG API 5CT Grau N80Q do tipo Casing, soldados pelo processo ERW/HFIW, utilizados na prospecção e exploração de petróleo e gás. A técnica ultrassônica da birrefringência acústica foi usada para avaliar o comportamento acustoelástico da chapa de aço que deu origem aos tubos em estudo. Antes e após as etapas de tratamento térmico de têmpera/revenido e de desempenho a quente os tubos também foram avaliados acustoelasticamente. A constante acustoelástica do material foi obtida por ensaio de carregamento uniaxial em oito cargas pré-determinadas. A avaliação acustoelástica dos tubos mostra uma anisotropia acústica de nível reduzido quando comparados a tubos API 5L com solda. Foi verificada ainda uma redução do nível de anisotropia após cada uma das etapas de fabricação avaliadas, mostrando a eficácia do tratamento térmico de têmpera/revenido e do desempenho a quente. Foi determinada a tensão residual circunferencial existente em um tubo pela técnica ultrassônica da birrefringência acústica e comparada com a tensão obtida pela metodologia da norma ASTM E1928-07.

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

ACOUSTOELASTIC EVALUATION OF OCTG API 5CT N80Q CASING PIPES  
WELDED BY ERW/HFIW PROCESS

Manoel Antonio da Costa Fonseca

March/2012

Advisor: João da Cruz Payão Filho

Department: Metallurgical and Materials Engineering

This paper presents an acoustoelastic evaluation of six OCTG API 5CT N80Q casing pipes welded by ERW/HFIW process, which are used in oil and gas exploration and exploitation. The ultrasonic technique of acoustic birefringence was employed to evaluate the acoustoelastic behavior of the steel plate used to manufacture the pipes under study. The pipes were evaluated before and after the heat treatments of quench tempering and hot straightening were performed. The acoustoelastic constant of the material was obtained through an uniaxial loading test at eight predetermined loads. The results obtained for the pipes show a reduced level of acoustic anisotropy compared with the API 5L welded pipe. A reduction in the level of acoustic anisotropy was also verified after each manufacturing step, showing the efficacy of the heat treatment of quench tempering and hot straightening. The circumferential residual stress in a pipe was determined by the acoustic birefringence technique and compared with the value obtained by the methodology of the ASTM E1928-07 Standard.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Considerações Iniciais .....	1
1.2 Estudo e Objetivo .....	2
1.3 Escopo da Pesquisa .....	3
<b>CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>4</b>
2.1 Um Desafio da Comunidade de Ensaios Não Destrutivos .....	4
2.2 Tensões Atuantes.....	5
2.2.1 Tensão Aplicada .....	5
2.2.2 Tensão Residual ou Interna .....	5
2.2.2.1 Produção de Tensão Residual.....	5
2.2.2.2 Categorização das Tensões Residuais.....	6
2.3 Efeitos da Tensão Residual sobre o Desempenho de Operação .....	8
2.3.1 Técnica Semidestrutiva na Medição de Tensão Residual .....	9
2.3.2 Técnicas Não Destrutivas na Medição de Tensão Residual.....	12
2.4 A Técnica Ultrassônica Convencional.....	13
2.4.1 Tipos de Ondas Ultrassônicas .....	13
2.4.1.1 Ondas Longitudinais (Compressão).....	14
2.4.1.2 Ondas Transversais (Cisalhantes).....	14
2.4.1.3 Ondas Superficiais (Rayleigh).....	15
2.4.2 O Transdutor Ultrassônico .....	15
2.4.2.1 Cristais Piezelétricos .....	16
2.5 A Técnica Ultrassônica na Avaliação de Tensões.....	17
2.5.1 O Sistema Ultrassônico.....	23
2.5.2 A Prática da Técnica Ultrassônica.....	27
2.6 Tubos LINE PIPE e OCTG .....	29
2.6.1 Tubos para Condução e Distribuição / LINE PIPE .....	30
2.6.2 Tubos para Exploração e Produção / OCTG.....	31
2.6.2.1 Resistência de um Tubo OCTG do Tipo Casing ao Colapso .....	33
2.6.2.2 Efeito da Tensão Residual Sobre a Resistência ao Colapso .....	34
2.6.3 Processos de Fabricação de Tubos .....	36
2.6.3.1 Tubos Com Solda .....	36
2.6.3.2 Tubos Sem Solda .....	39

<b>CAPÍTULO 3 – Material e Metodologias .....</b>	<b>41</b>
3.1	Considerações Iniciais..... 41
3.2	Material Utilizado .....
3.3	A Técnica Ultrassônica na Avaliação Acustoelástica dos Tubos em Estudo .....
3.3.1	Sistema Ultrassônico .....
3.3.2	Método de Captura dos Sinais Ultrassônicos a ser Usado no Estudo
3.3.2.1	Metodologia de Captura Par-a-par.....
3.3.2.2	Metodologia de Captura Contínua .....
3.3.2.3	Teste Usando a Metodologia de Captura Par-a-par.....
3.3.2.4	Teste Usando a Metodologia de Captura Contínua .....
3.3.2.5	Escolha da Metodologia de Captura do Sinal Ultrassônico .....
3.4	Atividades Práticas Realizadas na Indústria .....
3.4.1	Marcação e Identificação dos Pontos de Inspeção nos Tubos em Estudo .....
3.4.2	Primeira Avaliação Acustoelástica na Área de Produção .....
3.4.3	Retorno dos Tubos em Inspeção a Linha de Produção .....
3.4.4	Levantamento da Constante Acustoelástica do Material .....
3.4.5	Segunda Avaliação Acustoelástica na Área de Produção .....
3.4.6	Terceira Avaliação Acustoelástica na Área de Produção .....
3.5	Atividades Práticas Realizadas no Laboratório de Ultrassom .....
3.5.1	Levantamento da Birrefringência Acústica do Material ( $B_{MAT}$ ) .....
3.5.2	Tensão Residual Existente no Tubo.....
<b>CAPÍTULO 4 – Resultados e Discussões.....</b>	<b>73</b>
4.1	Testes para Seleção da Metodologia de Captura dos Sinais Ultrassônicos a ser Usada no Estudo .....
4.1.1	Metodologia “Par-a-par” .....
4.1.2	Metodologia “Contínua”.....
4.1.3	Seleção da Metodologia de Captura dos Sinais Ultrassônicos.....
4.2	Levantamento da Constante Acustoelástica do Material (A) .....
4.3	Determinação da Birrefringência Acústica do Material ( $B_{MAT}$ ).....
4.4	Avaliação Acustoelástica dos Tubos.....
4.4.1	Antes do Tratamento Térmico.....
4.4.2	Após o Tratamento Térmico.....
4.4.3	Após o Desempeno a Quente .....
4.5	Determinação da Tensão Residual no Tubo .....

4.5.1	Avaliação da Tensão Residual no Tubo Segundo a Norma ASTM E1928-07 .....	98
4.5.2	Determinação da Tensão Residual por Ultrassom .....	102
<b>CAPÍTULO 5 – Conclusões .....</b>		<b>110</b>
<b>CAPÍTULO 6 – Sugestões para Pesquisas Futuras.....</b>		<b>111</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>		<b>113</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tensões Residuais Macroscópicas em várias escalas [13] .....	07
Figura 2 – Sobreposição de tensões residuais e aplicadas [12].....	09
Figura 3 – Técnicas semidestrutivas para determinação de tensões residuais [15] ....	10
Figura 4 – Roseta extensométrica (dimensões em mm) [18] .....	11
Figura 5 – Onda Longitudinal ou de Compressão [22] .....	14
Figura 6 – Onda Transversal ou Cisalhante [22] .....	15
Figura 7 – O efeito piezolétrico num cristal [22] .....	16
Figura 8 – Desenho esquemático de um transdutor reto ou normal [22] .....	17
Figura 9 – (a) As cinco diferentes combinações de velocidade da onda e polarização que podem ser consideradas num meio isotrópico (b) e o caso especial da birrefringência [1] .....	18
Figura 10 – Esquema com as direções de tensão (direção do carregamento), de polarização e de simetria ortotrópica e seus respectivos ângulos usadas pela teoria da birrefringência [14,26].....	22
Figura 11 – Sistema Ultrassônico .....	24
Figura 12 – Aparelho de ultrassom modelo EPOCH4 PLUS da PANAMETRICS.....	24
Figura 13 – Filtro de redução de tensão.....	25
Figura 14 – Osciloscópio modelo TDS3032 da TEKTRONIX.....	25
Figura 15 – Transdutor ultrassônico de onda cisalhante de 2,25 MHz da PANAMETRICS.....	26
Figura 16 – (a) Microcomputador e (b) Notebook.....	26
Figura 17 – Direção de polarização (movimento das partículas).....	27
Figura 18 – Telas dos programas de: (a) Captura do sinal ultrassônico (WaveStar for Oscilloscope) e (b) Processamento do sinal (CHRONOS/IEN).....	28
Figura 19 – Ensaio ultrassônico e de carregamento uniaxial de um corpo de prova sendo realizados na Máquina de Ensaio Universal da empresa APOLO TUBULARS .....	28
Figura 20 – Variação da birrefringência em função da tensão aplicada nos CP's no tubo 06 (API-5LX-70-SAW) e suas respectivas constantes acustoelásticas [8] .....	29
Figura 21 – Fabricação de tubos a partir de bobinas laminadas ERW [39] .....	36
Figura 22 – Processo de fabricação de tubos a partir de chapas laminadas SAW [40] .....	37
Figura 23 – Processo de fabricação de tubo helicoidal [41] .....	38

Figura 24 – Fabricação de tubos por laminação – Laminador oblíquo “Mannesmann” [30] .....	39
Figura 25 – Laminadores e acabamento [30] .....	40
Figura 26 – Os seis tubos OCTG do tipo Casing em estudo .....	41
Figura 27 – Bobinas fornecidas pela CSN sendo posicionadas para o processo de corte e rebobinamento em bobinas com a largura final necessária para atender ao diâmetro final desejado na linha de fabricação .....	42
Figura 28 – Conjunto de cinco bobinas com a largura desejada, geradas de uma bobina matriz .....	43
Figura 29 – Fluxograma da linha de fabricação e de controle de qualidade da APOLO TUBULARS S.A. para os tubos OCTG [4] .....	44
Figura 30 – Identificação dos tubos realizada na linha de fabricação por micropuncionamento, mostrando o número do tubo e o código da corrida de produção do tubo .....	45
Figura 31 – Desenho esquemático do sistema ultrassônico utilizado no estudo .....	47
Figura 32 – Sistema ultrassônico usado no estudo na área reservada da linha de produção .....	48
Figura 33 – Em detalhe o corpo-de-prova CP-0 com o ponto de inspeção 6H marcado e identificado (a 180° da solda), posicionado ao centro do comprimento do CP .....	50
Figura 34 – Osciloscópio com um sinal ultrassônico capturado em sua tela .....	52
Figura 35 – Transdutor ultrassônico de onda cisalhante e incidência normal acoplado no ponto 6H (180° da solda) ao centro do comprimento do CP-0 .....	53
Figura 36 – Desenho esquemático de um tubo inspecionado com a região de estudo contendo seus cinco pontos de avaliação .....	54
Figura 37 – Marcação dos cinco pontos na região selecionada de um tubo em estudo onde um gabarito é posicionado e utilizado na marcação .....	55
Figura 38 – Tubo em inspeção na primeira fase do estudo na área de produção .....	56
Figura 39 – Pintura das extremidades dos tubos OCTG do tipo Casing em estudo sendo realizada por um técnico da APOLO TUBULARS .....	57
Figura 40 – Os seis tubos com a faixa branca nas extremidades retornando a linha de fabricação antes da etapa do tratamento térmico de têmpera/revenido ....	58
Figura 41 – Tubo em ensaio passando pela fase de Têmpera na etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido .....	58
Figura 42 – Tubo 1 entrando no compartimento de resfriamento e recebendo o banho de têmpera .....	59
Figura 43 – Fase do Revenido dos tubos OCTG Casing em estudo .....	60

Figura 44 – Tubo 1 iniciando a sua passagem pela etapa de desempenho a quente ...	60
Figura 45 – Corpo-de-prova CP-L2 durante o ensaio de carregamento uniaxial para levantamento da Constante Acustoelástica do material usado na fabricação dos tubos em estudo .....	62
Figura 46 – Máquina de Ensaio Universal e parte da equipe técnica durante o ensaio de carregamento para levantamento da constante acustoelástica do material.....	63
Figura 47 – Remarcação de alguns pontos de inspeção num tubo que apresentaram dificuldade de visualização após o tratamento térmico de têmpera/revenido .....	64
Figura 48 – Equipe realizando a remarcação de alguns pontos dos Tubos 1, 2 e 3....	65
Figura 49 – Localização da região do Corpo-de-prova Final (CP-F) extraído do Tubo 1 destacada em vermelho no desenho .....	65
Figura 50 – Desenho esquemático para marcação e identificação dos 30 pontos de inspeção no corpo-de-prova CP-4 .....	66
Figura 51 – Corpo-de-prova CP-4 extraído da bobina de aço com seus trinta pontos de inspeção marcados e identificados para efetuar o levantamento do ( $B_{MAT}$ ) .....	67
Figura 52 – Desenho do Corpo-de-prova Final (CP-F) extraído do Tubo 1 .....	68
Figura 53 – Corpo-de-prova CP-F mostrando o encontro das quatro seções circunferenciais (A, B, C e D) com as linhas longitudinais traçadas nos pontos 3H e 6H em destaque .....	70
Figura 54 – No detalhe o CP-F com o rasgo (CP-F-RA) e os fixadores especiais confeccionados para este estudo (um em cada extremidade) .....	71
Figura 55 – Corpo-de-prova Inicial CP-0 e o sistema ultrassônico durante um dos testes para seleção da metodologia de captura do sinal ultrassônico.....	73
Figura 56 – Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização longitudinal no ponto 6H (62% de frequência do tempo de $4,914E-06$ ).....	74
Figura 57 – Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização transversal no ponto 6H (36% de frequência do tempo de $4,920E-06$ ).....	76
Figura 58 – Tempo de percurso da onda ultrassônica na direção longitudinal (68% de frequência do tempo de $4,926E-06$ ).....	78
Figura 59 – Tempo de percurso da onda ultrassônica na direção transversal (64% de frequência do tempo de $4,926E-06$ ).....	79

Figura 60 – Variação de B em função da tensão aplicada ao CP-L2 durante o ensaio de carregamento uniaxial para levantamento da constante acustoelástica do material.....	82
Figura 61 – Corpo-de-prova CP-4 retirado da bobina de aço no momento em que o ponto 8 está sendo inspecionado pelo técnico em ultrassom .....	83
Figura 62 – Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção longitudinal pelos 30 pontos de inspeção localizados no CP-4 .....	85
Figura 63 – Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção transversal pelos 30 pontos de inspeção localizados no CP-4.....	85
Figura 64 – Variação do valor da birrefringência acústica pelos trinta pontos inspecionados do CP-4.....	86
Figura 65 – Desenho mostrando a distribuição circunferencial dos cinco pontos de inspeção na região em estudo.....	87
Figura 66 – Transdutor ultrassônico cisalhante de incidência normal sendo posicionado para a captura de sinais ultrassônicos com a onda polarizada na direção transversal.....	88
Figura 67 – Variação de B nos seis tubos (AT) em estudo .....	90
Figura 68 – Comparação da variação de B nos seis tubos OCTG em estudo com tubos Pipeline API 5LX-70 avaliados em outra oportunidade pela mesma técnica [7] .....	91
Figura 69 – Tubos 1, 2 e 3 sendo pintados em suas extremidades para facilitar o controle dos mesmos na linha de fabricação .....	92
Figura 70 – Variação de B nos cinco pontos de inspeção Depois do Tratamento térmico de têmpera/revenido dos tubos 4, 5 e 6 (DT) .....	94
Figura 71 – Variação de B nos cinco pontos de inspeção depois da etapa de desempenho a quente dos tubos 1, 2 e 3.....	96
Figura 72 – Variação da anisotropia do material durante as etapas avaliadas acustoelasticamente.....	97
Figura 73 – Imagem da ZTA determinada logo após o processo de soldagem por indução ocorrer para a união do tubo .....	99
Figura 74 – CP-F sendo usinado por uma fresa de topo com arestas de corte helicoidais durante a operação de corte .....	100
Figura 75 – CP-F logo após a confecção do rasgo por fresamento passando a ser denominado de CP-F-RA.....	100
Figura 76 – Variação de B do Tubo 1 nas três etapas de inspeção (AT, DD e CP-F-RA) .....	103

Figura 77 – Comportamento da Tensão existente nos pontos de inspeção do Tubo 1 – DD e do CP-F-RA.....	105
Figura 78 – Comportamento da tensão residual nos pontos de inspeção do Tubo 1 – DD .....	106
Figura 79 – Comparação do grau de anisotropia entre dois tubos API 5LX-46 (com e sem solda) [6] com o Tubo 1 – DD em estudo (com solda).....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas dos aços API 5LX.....	30
Tabela 2 – Propriedades Mecânicas dos aços API 5CT .....	32
Tabela 3 – Tensões residuais em tubos do tipo Casing antes e após o desempenho [38] .....	35
Tabela 4 – Composição do material usado na confecção dos tubos em estudo .....	42
Tabela 5 – Referência usada para os tubos em estudo .....	53
Tabela 6 – Tempos obtidos no teste com a metodologia de captura de sinal “Par-a-par” aplicada ao corpo-de-prova CP-0 .....	75
Tabela 7 – Tempos obtidos no teste com a metodologia de captura de sinal “Contínua” aplicada ao corpo-de-prova CP-0 .....	77
Tabela 8 – Relação Carga x Tensão aplicada no CP-L2 durante o ensaio de tração uniaxial com parada nas cargas pré-selecionadas .....	81
Tabela 9 – Dados obtidos no teste com o corpo-de-prova CP-4 .....	84
Tabela 10 – Resultados da primeira inspeção na linha de fabricação da indústria.....	89
Tabela 11 – Resultados da segunda inspeção na linha de fabricação da indústria.....	93
Tabela 12 – Resultados da terceira inspeção na linha de fabricação da indústria.....	95
Tabela 13 – Diâmetro externo inicial ( $D_0$ ) do CP-F.....	98
Tabela 14 – Diâmetro externo final ( $D_F$ ) do CP-F-RA.....	101
Tabela 15 – Espessura da parede ( $e$ ) do CP-F-RA.....	101
Tabela 16 – Tempos e birrefringências dos pontos em inspeção do CP-F-RA.....	102
Tabela 17 – Valores de Tensão encontrados nos cinco pontos de inspeção no Tubo 1 - DD e no CP-F-RA e suas médias considerando $B_0 = B_{MAT}$ .....	104
Tabela 18 – Valores de Tensão residual existentes nos cinco pontos de inspeção no Tubo 1 – DD e sua média ( $B_0 = B_{MAT}$ ).....	105
Tabela 19 – Tensão residual média no Tubo 1 - DD considerando $B_0 = B_{CP-F-RA}$ .....	107
Tabela 20 – Valores da birrefringência nos pontos de inspeção dos tubos API 5L [6] e do Tubo 1 – DD em estudo .....	108

# ***CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO***

## ***1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS***

A importância de se contar com técnicas não destrutivas que possibilitem avaliar tensões em estruturas e/ou componentes mecânicos, focando a segurança física, a preservação do meio ambiente e a evitar perdas financeiras decorrentes de vazamentos, quer seja na prospecção, produção, condução ou distribuição de gás, petróleo e seus derivados, causou uma corrida nas últimas décadas dentro da comunidade de ensaios não destrutivos na busca de técnicas que permitissem avaliar o estado de tensão com precisão e segurança de modo a garantir a integridade estrutural [1].

Dutos instalados em terrenos geologicamente instáveis, bem como em águas profundas, sofrem pressões externas que podem danificá-los. O caso extremo é o de colapso de um duto, problema este que sempre é cuidadosamente avaliado nas áreas de projetos onshore e offshore, visando assegurar a confiabilidade dos mesmos durante a vida prevista, evitando este tipo de problema.

Atualmente, com a necessidade da exploração de poços cada vez mais profundos (o Pré-sal, por exemplo), ocorre um estudo permanente na obtenção de materiais cada vez mais resistentes e seguros. Além disso, os processos de fabricação evoluem o tempo todo em busca da obtenção de estruturas e componentes mecânicos cada vez mais leves e seguros e, de fácil fabricação e montagem.

À malha de dutos existente em nosso país se aliam terminais e uma frota de navios-petroleiros, unindo as áreas de produção, refino e distribuição da PETROBRAS, atuando na importação e exportação de petróleo e derivados, de biocombustíveis e de gás natural [2].

A busca incessante pela autossuficiência na produção de petróleo nas últimas décadas no Brasil obteve sucesso graças a inúmeras descobertas em nossa plataforma oceânica. Pelas atividades desta indústria é gerada uma produção de gás e petróleo que é transportada por uma extensa malha de dutos submarinos que esta concentrada em uma grande área a 100 Km da costa, com lâminas d'água variando de 60 até 1000 metros [3].

## **1.2 – ESTUDO E OBJETIVO**

A avaliação de tensões em tubos é um problema extremamente complexo. A dificuldade do uso da técnica ultrassônica da birrefringência acústica está na grande heterogeneidade da anisotropia do material decorrente do processo de fabricação do tubo, criando dificuldade em estabelecer o parâmetro da birrefringência inicial.

Com a oportunidade dada pela empresa APOLO TUBULARS S.A., foi realizado um estudo de avaliação acustoelástica em tubos OCTG (Oil Country Tubular Goods) API 5CT Grau N80 do tipo Casing, soldados com o processo ERW/HFIW (Electric Resistance Welding / High Frequency Induction Welding), empregando a técnica ultrassônica da birrefringência acústica, em três etapas de fabricação, com o objetivo de obter conhecimento que permitisse avaliar o estado de tensões existente em tubos OCTG.

Os tubos OCTG do tipo Casing fornecidos e ensaiados atendem aos limites definidos pela norma API 5CT de resistência a pressões externas (colapso), estando acima dos mesmos [4]. Este tipo de tubo é submetido a elevadas pressões externas quando em serviço.

Foram avaliados inicialmente seis tubos retirados da linha de fabricação antes da etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido. Após a primeira avaliação, estes tubos retornaram a mesma posição da linha de fabricação e passaram pela etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido. Ao término desta etapa três tubos foram retirados da linha de produção para sofrerem nova inspeção ultrassônica ao atingirem a temperatura ambiente e os outros três continuaram na linha até passarem pela etapa de desempenho a quente. Em seguida estes três tubos foram extraídos da linha de produção após essa etapa para serem novamente inspecionados ultrassonicamente. De um destes três últimos tubos foi extraído um corpo-de-prova (CP) e verificado o tipo e o nível do estado tensões residuais circunferencial presente, através do corte do CP por fresamento.

O estudo mostrou que todos os tubos OCTG API 5CT em avaliação apresentaram um comportamento anisotrópico em todas as etapas de fabricação estudadas, embora esta anisotropia fosse menor que a apresentada por tubos do tipo Pipeline API 5LX com limites de escoamento menores [5 a 7]. Além disso, foi verificada a importância das etapas de tratamento térmico de têmpera/revenido e de desempenho a quente, para a obtenção de tubos de elevada resistência mecânica e, a tensão residual existente em um tubo que passou por essas duas etapas de fabricação.

### **1.3 – ESCOPO DA PESQUISA**

Esta dissertação contém os seguintes capítulos:

1. **INTRODUÇÃO (em apresentação)**
2. **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**
3. **MATERIAL E METODOLOGIAS**
4. **RESULTADOS E DISCUSSÕES**
5. **CONCLUSÕES**
6. **SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

## ***CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

### ***2.1 – UM DESAFIO DA COMUNIDADE DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS***

A necessidade de se ter em mãos técnicas não destrutivas que permitam avaliar as tensões residuais existentes numa estrutura ou num componente metálico, alavancou nas últimas décadas uma corrida nas áreas de pesquisa e desenvolvimento da comunidade de ensaios não destrutivos, visando à obtenção de novas técnicas que permitam avaliações precisas e seguras de modo a garantir a integridade estrutural [1 e 8].

Devido à segurança física, à preservação do meio ambiente e a evitar perdas financeiras decorrentes de vazamentos na exploração, produção, condução e distribuição de gás natural e petróleo, é essencial o controle do nível de tensões residuais de modo a permitir o perfeito e idealizado controle das redes petrolíferas.

Um bom exemplo da importância da avaliação das tensões residuais é o de dutos instalados em terrenos geologicamente instáveis, pois estão sujeitos a cargas inesperadas causadas por movimentos do solo como terremotos, desmoronamentos, construção de rodovias, bem como por colisões causadas de maneira não intencional em serviços de escavações não autorizados e, outros contratemplos [9, 10 e 11]. Quando um dano é descoberto num duto é necessário um julgamento imediato quanto à capacidade de serviço do mesmo. Para isso deve ser conhecido o nível de tensão elástica ainda presente na parede do duto bem como o grau de deformação plástica que a parede possa ter [9].

No caso específico das instalações offshore os tubos de exploração, produção, condução e os que compõem as próprias estruturas das plataformas marítimas, também estão sujeitos a esses tipos de cargas inesperadas causadas pelos movimentos do mar (inclusive maremoto), bem como pela pressão hidrostática exercida sobre as paredes das redes dutoviárias submarinas. Logo, técnicas que possibilitem avaliar o nível de tensões nas tubulações que compõem as redes petrolíferas são de fundamental importância.

Segundo a literatura as etapas de conformação mecânica durante o processo de fabricação de tubos com solda, construídos de chapas laminadas, geram diferentes graus de anisotropia na seção transversal do tubo [6].

## **2.2 – TENSÕES ATUANTES**

Quando não está em serviço, atuam num material ou componente mecânico apenas as tensões residuais, mas em serviço tem-se o conjunto de tensões residuais e aplicadas. É de fundamental importância a compreensão na atuação de cada tipo de tensão.

### **2.2.1 – TENSÃO APLICADA**

É toda e qualquer tensão aplicada sobre um material de uma estrutura ou componente mecânico em serviço ou devido a um gradiente térmico, isto é, a tensão que não é inerente à fabricação do material.

### **2.2.2 – TENSÃO RESIDUAL OU INTERNA**

Quando existe um estado de tensão num material, sem aplicação de carga externa ou outra fonte de tensão, tal como um gradiente térmico, esta tensão existente é chamada de tensão interna ou residual [12].

#### **2.2.2.1 – PRODUÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL**

A tensão residual surge em materiais de componentes ou estruturas mecânicas durante os estágios de fabricação por muitas razões [12 e 13]:

- Na deformação ou conformação plástica como, por exemplo, laminação, trefilação, extrusão, dobramento, forjamento, prensagem, shot peening (partículas esféricas metálicas, de vidro ou de cerâmica) e laser shock peening (LSP) [12];
- Durante os processos de fabricação tais como: soldagem, brasagem, revestimento, eletrodeposição, usinagem, retífica, etc. [12];

- Durante tratamento térmico ou termoquímico incluindo resfriamento brusco, cementação, nitretação, endurecimento superficial dos aços e eletrodeposição de íons [12].

Como exemplo de tratamentos térmicos aplicados durante a fabricação que podem afetar a tensão residual, pode ser citado o resfriamento brusco a partir de uma temperatura elevada o qual pode causar tensão residual no material, enquanto um tratamento de alívio de tensão pode reduzi-la [13].

A operação de montagem das estruturas metálicas e componentes mecânicos também geram tensões residuais [14].

### **2.2.2.2 – CATEGORIZAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS**

As tensões residuais podem ser classificadas pelas Fontes de Geração, como [1]:

#### **(i) Relacionadas ao material**

Um bom exemplo é a tensão trativa gerada nos compósitos de matriz metálica durante a fabricação devido à diferença de expansão térmica entre a fibra e a matriz metálica. Outros exemplos incluem o material com a microestrutura de múltiplas fases ou inclusões [1].

#### **(ii) Relacionadas ao processo**

Inclui aquelas geradas durante a soldagem, fundição, resfriamento brusco, corte, cementação, etc. [1].

A maioria das tensões relacionadas aos processos é prejudicial ao tempo de vida em serviço de um componente, porém algumas são benéficas. Como exemplo, algumas técnicas são usadas para a produção de tensões residuais compressivas abaixo da superfície, aumentando significativamente a resistência à fadiga do componente [1].

**(iii) Causadas com relação ao serviço**

São tensões como aquelas produzidas pela deformação plástica em superfícies laminadas [1].

Outra maneira de se classificar as tensões residuais é pela distribuição espacial delas. Em função da distância ou intervalo sobre o qual as tensões residuais podem ser observadas elas são classificadas em três tipos [1 e 12].

**(i) As do tipo 1 são chamadas de macroscópicas**

Cobrem uma grande faixa que se estende pelo menos por vários grãos do material [7]. Alguns exemplos deste tipo podem ser vistos na Figura 1 a seguir [13].

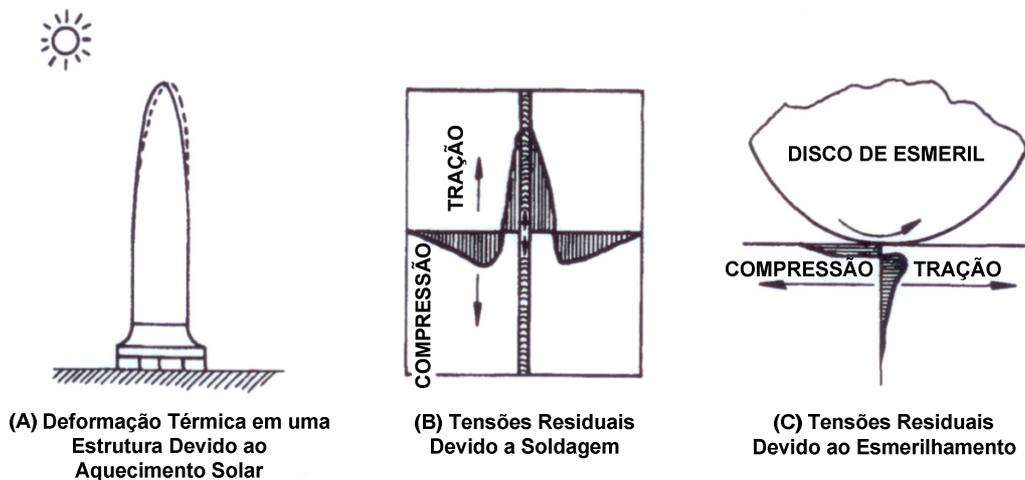


Figura 1 – Tensões Residuais Macroscópicas em várias escalas [13]

**(ii) As do tipo 2 são denominadas de microscópicas e são muitas vezes chamadas de microtensões estruturais.**

Cobrem a distância de um grão ou parte dele. Elas podem ocorrer entre diferentes fases e tendo características físicas diferentes, ou entre

partículas incorporadas, tais como inclusões e a própria matriz [12]. Estas tensões ocorrem devido à anisotropia dos grãos ou a aparência de diferentes fases [1].

***(iii) E finalmente as do tipo 3, também chamadas de microscópicas***

Estas ocorrem numa escala muito menor que a de um grão e estão associadas com as imperfeições cristalográficas tais como discordâncias [1]. Elas percorrem várias distâncias atômicas dentro do grão e permanecem equilibradas apenas numa pequena parte do mesmo [12].

**2.3 – EFEITOS DA TENSÃO RESIDUAL SOBRE O DESEMPENHO DE OPERAÇÃO**

É conhecido que a tensão residual trativa reduz a capacidade de atuação sobre a vida de resistência à fadiga, propagação de trinca e corrosão sob tensão de materiais enquanto a tensão residual compressiva tem um efeito benéfico [12].

Para compreender bem o princípio da sobreposição das diferentes espécies de tensão (aplicadas e residuais), considere uma amostra sujeita a tensão residual, caracterizada por um vetor  $\sigma_r$ , num ponto em um plano de tensão aplicada definido. A seguir sobreponha a este mesmo ponto e no mesmo plano, uma tensão aplicada  $\sigma_s$ , e a tensão real aplicada à amostra  $\sigma_n$  é caracterizada pelo vetor [12]:

$$\sigma_n = \sigma_r + \sigma_s \quad (1) [12]$$

A Figura 2 mostra um exemplo deste tipo de sobreposição de tensões, residual e aplicada, durante um ensaio de fadiga de flexão.

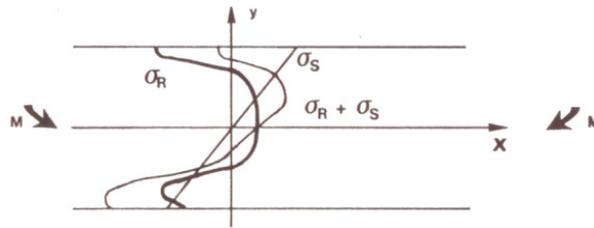


Figura 2 – Sobreposição de tensões residuais e aplicadas [12]

Vê-se que considerando uma tensão residual compressiva, com uma tensão aplicada  $\sigma_s$  de sinal oposto (trativa), a tensão real aplicada no material  $\sigma_n$ , é menor que  $\sigma_s$ . Se a tensão aplicada  $\sigma_s$  tiver o mesmo sinal, a tensão real  $\sigma_n$  é maior que  $\sigma_s$ . Assim, verifica-se que a tensão residual atua como uma tensão média, afetando o comportamento mecânico dos materiais: na fratura frágil, na fadiga e na corrosão sob tensão e por fadiga [12].

### **2.3.1 – TÉCNICA SEMIDESTRUTIVA NA MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL**

Algumas técnicas se baseiam na destruição do estado de equilíbrio da tensão residual em um componente mecânico. Logo, a tensão residual é medida pela sua relaxação. A seguir, a descrição do procedimento usado [12]:

1. Criação de um novo estado de tensão por usinagem ou por remoção de camada;
2. Detecção da mudança local em tensão pela deformação ou deslocamento;
3. Cálculo da tensão residual como uma função da deformação medida usando a teoria elástica.

Entre as técnicas semidestrutivas ou parcialmente destrutivas existentes para determinar tensões residuais duas são baseadas em extensômetros (strain gages) e são comumente usadas (Figura 3): a do Furo Cego e a do Núcleo do Anel [15 e 16].

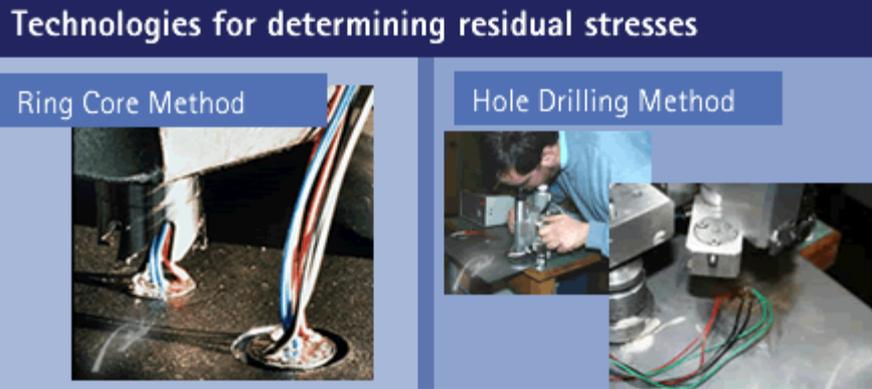


Figura 3 – Técnicas semidestrutivas para determinação de tensões residuais [15]

- **Método do Furo Cego (Hole-Drilling Method)**

Este método é baseado na medição da variação da deformação superficial causada pela operação de usinagem de um pequeno furo raso na peça em teste. Seu princípio é o de quando no material tensionado se realiza a remoção de material, ao redor ocorre um reajustamento no estado de tensão de maneira a atingir o estado de equilíbrio [17]. Ou seja, a usinagem do furo provocará o alívio das tensões existentes que atuam no volume de material removido, que por sua vez provocará mudança nos estados de deformação em pontos da região no entorno do furo [18].

Como aspecto negativo apresenta o caráter semidestrutivo, uma vez que é necessário executar um pequeno furo cego no material a ser medido. Trata-se de um furo pequeno, de 1,6 mm de diâmetro, e de não mais de 1,4 mm de profundidade. Quando necessário, após o término da medição, aplica-se uma ferramenta abrasiva para produzir um “adoçamento” da região do furo, tornando-a geometricamente suave [19].

Para a medição da variação da tensão é utilizada uma roseta (Figura 4) contendo extensômetros, instalada de forma convencional na superfície da peça cujas tensões devem ser medidas [19]. Estes extensômetros colados próximos à região onde o furo é usinado medem as mudanças nas deformações provocadas pelas tensões aliviadas devido à usinagem do furo [24]. Ao final de cada passo de furação, as deformações de cada extensômetro são medidas e esses dados, juntamente com as características da ferramenta de furação, propriedades do material e características da roseta extensométrica são usados para determinar o estado de tensões residuais [19].

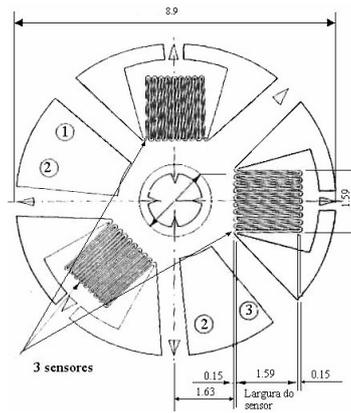


Figura 4 – Roseta extensométrica (dimensões em mm) [18]

- **Método do Núcleo do Anel (Ring Core Method)**

É uma técnica utilizada para quantificar as principais tensões residuais numa determinada profundidade do material. A técnica baseia-se na teoria elástica e consiste num corte circular ao redor da roseta extensométrica. Durante a operação de corte a tensão residual na peça é aliviada. A variação da deformação é monitorada como uma função da profundidade de corte por um computador. Esta técnica pode ser usada em metais, cerâmicas e polímeros [20]. Como aspecto negativo apresenta também o caráter semidestrutivo.

Uma característica comum de ambas as técnicas consiste no fato de que, depois da instalação das rosetas extensométricas na peça de trabalho, o estado da tensão residual é perturbado por interferência mecânica. Após esta interferência as tensões residuais causam deformações por dentro da superfície da peça de trabalho. Estas deformações são medidas por extensômetros (strain gages) e depois usadas para calcular o estado de tensão residual [15].

Com a associação de equações de elasticidade calculam-se as tensões residuais existentes anteriormente no material. Embora estas técnicas sejam consideradas semidestrutivas são as mais utilizadas [7].

Na técnica do Furo Cego a alta velocidade usada na usinagem do furo muitas vezes pode causar tensões residuais nos materiais endurecíveis a frio como as superligas a base de níquel e os aços inoxidáveis. As tensões de usinagem não têm efeito significativo na técnica do Núcleo do Anel [20].

Todos os métodos semidestrutivos são sensíveis à tensão residual macroscópica [7].

### **2.3.2 – TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS NA MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL**

É importante a avaliação de tensão residual em qualquer material estrutural ou componente mecânico, pois existe uma evidência de não ser possível prever de maneira precisa e confiável o tempo de vida remanescente destes sem uma avaliação apropriada da medição das tensões residuais presentes. Infelizmente, estas tensões são usualmente muito incertas e isto se deve ao fato delas terem origens diversas as quais variam altamente e também porque tendem a sofrer relaxação termomecânica em temperaturas de operação, as quais causam uma maior incerteza [1]. Assim, é evidente a necessidade do desenvolvimento de técnicas não destrutivas que permitam medir as tensões residuais em qualquer material estrutural ou componente. Existem algumas técnicas já aperfeiçoadas e outras ainda em fase de desenvolvimento. As técnicas não destrutivas usadas se baseiam na relação entre parâmetros físicos ou cristalográficos e a tensão residual [12].

A questão mais crítica associada com a avaliação não destrutiva das tensões residuais parece ser a da seletividade. Vários métodos não destrutivos mostraram-se sensíveis a presença de tensão residual, mas infelizmente, muito sensíveis também a outras variações espúrias que usualmente acompanham as tensões residuais tais como, anisotropia da textura, heterogeneidade microestrutural, deformação plástica, etc., as quais poderiam interferir ou não com a deformação elástica causada pela tensão residual observada. O único método disponível atualmente para avaliação de tensão e que é mais ou menos imune a estes efeitos espúrios é o da difração de raios-X, cuja medição é limitada a uma camada extremamente fina, menor que 20  $\mu\text{m}$  de penetração, de camada superficial. A técnica de difração de raios-X permite a medição estática e dinâmica de deformações restritas as elásticas e, apenas na região superficial [1 e 21]. Pode ser usada para maiores penetrações de profundidade, a radiação de alta energia por nêutrons, mas inviável pela fonte necessária [1]. Estas técnicas de difração podem ser usadas para estudar os três tipos de tensões residuais [12].

A técnica de Inspeção Magnética é comercialmente disponível para a avaliação de tensões, porém é limitada a materiais ferromagnéticos. [1]. Os métodos magnéticos de medição de tensão caem na interação entre a magnetização e a deformação elástica em materiais ferromagnéticos. Podem ser citados aqui os métodos do ruído de Barkhausen que se baseia na análise do domínio do movimento da parede magnética e, o da Magnetoestricção que se baseia na medição da permeabilidade e indução magnética [12].

Já a técnica de Corrente Parasita é uma técnica altamente precisa e reprodutiva, mas tem sido sugerido ser usada como principal candidata a avaliação de tensão residual superficial [1].

A técnica Termoelétrica para a avaliação de tensão residual é usada na medição de tensão em cantos, cunhas, furos rosqueados, etc., pois é imune aos efeitos de borda que surgem nas técnicas de Corrente Parasita e Ultrassônica [1].

A técnica ultrassônica na avaliação de tensões pode ser aplicada de modo superficial ou volumétrico, ou seja, utilizar ondas que percorram as superfícies como as longitudinais criticamente refratadas ( $L_{cr}$ ) e as que percorrem um volume, independente da espessura, como as ondas cisalhantes.

## **2.4 – A TÉCNICA ULTRASSÔNICA CONVENCIONAL**

O ensaio por ultrassom convencional caracteriza-se num método não destrutivo tendo por objetivo a detecção de defeitos ou discontinuidades internas, como bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro-trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos [22].

Portanto, o exame ultrassônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades.

A técnica ultrassônica utiliza ondas mecânicas que são compostas por oscilações de partículas que se propagam no meio em inspeção. A passagem desta onda acústica no meio faz com que as partículas do mesmo, executem o movimento de oscilação em torno da posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento diminuirá com o tempo devido à perda de energia adquirida pela onda [22].

### **2.4.1 – TIPOS DE ONDAS ULTRASSÔNICAS**

Assumindo que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem têm a liberdade de oscilar em qualquer direção, então as ondas acústicas podem se classificar em [22]:

### 2.4.1.1 – ONDAS LONGITUDINAIS (COMPRESSÃO)

São ondas cujas partículas oscilam na direção de propagação da onda, podendo ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases na direção de propagação da onda conforme apresentado na Figura 5 [22].

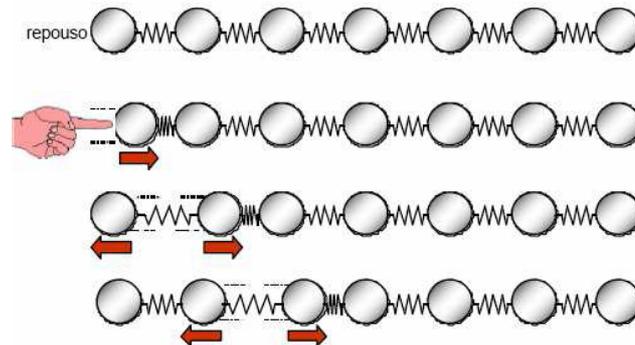


Figura 5 - Onda Longitudinal ou de Compressão [22]

Nota-se na figura a vibração e a transferência da energia cinética do primeiro plano de partículas para os próximos planos de partículas, que passam a oscilar. Desta maneira, todo o meio elástico vibra na mesma direção de propagação da onda longitudinal, e surgirão zonas de “compressão” e também “diluídas”. O comprimento de onda é determinado pelas distâncias entre duas zonas de compressão. Em função do processo de propagação, este tipo de onda possui uma alta velocidade de propagação como característica do meio [22].

### 2.4.1.2 – ONDAS TRANSVERSAIS (CISALHANTES)

Nestas ondas as partículas do meio vibram na direção perpendicular à direção de propagação, mantendo os planos de partículas equidistantes e num movimento vertical. A transmissão deste tipo de onda é eficaz apenas nos sólidos, pois nos líquidos e gases, pela característica de ligação das partículas nestes meios, elas são praticamente incapazes de se propagarem. Seu modo de propagação é ilustrado na Figura 6 a seguir [22].

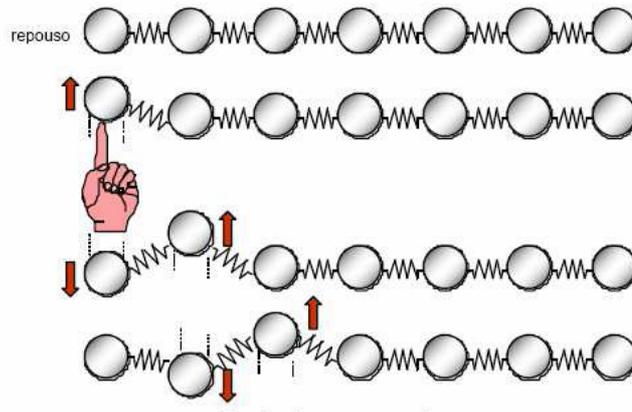


Figura 6 - Onda Transversal ou Cisalhante [22]

### 2.4.1.3 – ONDAS SUPERFICIAIS (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 de aproximadamente 10% inferior que a de uma onda transversal. Para o tipo de onda superficial que não possui a componente normal, portanto se propaga em movimento paralelo a superfície e transversal em relação à direção de propagação recebe a denominação de ondas de “Love”. Sua aplicação é restringida ao exame de finas camadas de material que recobrem outros materiais [22].

Para ondas superficiais que se propagam com comprimento de onda próximo a espessura da chapa ensaiada, ou seja, a inspeção não se restringe somente a superfície, mas a todo o material, são denominadas de ondas de “Lamb” [22].

### 2.4.2 – O TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO

As ondas ultrassônicas são geradas ou introduzidas no material através de um elemento emissor com uma determinada dimensão e que vibra com certa frequência. Este emissor pode se apresentar com determinadas formas (circular ou retangular). O elemento emissor pode atuar também como receptor, e é chamado de transdutor (ou cabeçote) [22].

Existem dois sistemas de geração de onda ultrassônica: os piezelétricos (PZT) e os eletromagnéticos (EMAT). Os transdutores com cristais PZT utilizam acoplante e convertem a energia elétrica em oscilação mecânica dentro do material. A vantagem

deste sistema é o baixo custo e maior relação entre sinal e ruído e, além disso, é o mais usado [7].

Já os transdutores do tipo EMAT não precisam de fluido de acoplamento acústico (acoplante), eliminando o efeito da pressão entre o transdutor e a amostra em ensaio, e são menos susceptíveis às variações de temperatura e de umidade. São muito usados nas áreas de ferrovias e de estruturas [7].

Diversos materiais (cristais) apresentam o efeito piezelétrico. Como exemplo, pegue uma lâmina de um cristal piezelétrico no formato de uma placa, ao aplicar uma pressão sobre a mesma, surgirão cargas elétricas em sua superfície. O efeito inverso também é verdadeiro: se aplicar dois eletrodos sobre as faces opostas de uma placa de cristal piezelétrico, de maneira que possa carregar eletricamente as faces, a placa comporta-se como se estivesse sobre pressão e diminui de espessura. Um cristal piezelétrico pode transformar a energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica (Figura 7) [22].

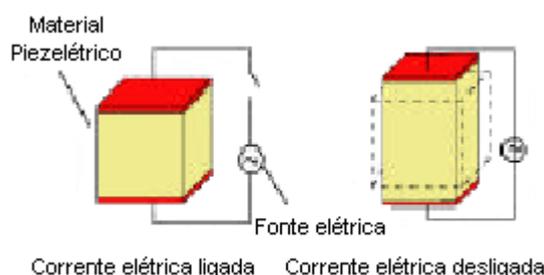


Figura 7 – O efeito piezelétrico num cristal [22]

Diversos materiais (cristais) apresentam o efeito piezelétrico. Este efeito é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezelétrico com tensão elétrica alternada da ordem de centenas de Volts, de maneira que o mesmo se contrai e se estende ciclicamente. Se tentarmos impedir esse movimento a placa transmite esforços de compressão as zonas adjacentes, emitindo uma onda longitudinal, cuja forma depende da frequência de excitação e das dimensões do cristal [22].

#### 2.4.2.1 – CRISTAIS PIEZELÉTRICOS

- Materiais piezelétricos
- Sulfato de Lítio
  - Titanato de Bário
  - Metaniobato de Chumbo
  - Zirconato-titanato de Chumbo

Quartzo é o material piezelétrico mais antigo, translúcido e duro como o vidro sendo cortado a partir de cristais originários no Brasil. Já o Sulfato de Lítio é um cristal sensível à temperatura e pouco resistente. O Titanato de Bário e Zirconato-titanato de Chumbo são materiais cerâmicos e os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia, se comparadas com aquelas produzidas por cristais de Quartzo [22].

Para a inspeção ultrassônica, interessa não só a potência de emissão, mas também a sensibilidade da recepção (resolução). A frequência ultrassônica gerada pelo cristal dependerá da sua espessura, cerca de 1 mm para 4 MHz e 2 mm para 2 MHz [22].

Os cristais são montados sobre uma base de suporte (bloco amortecedor) e junto com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor propriamente dito [22].

Existem três tipos usuais de transdutores: Reto ou normal, o angular e o duplo-cristal [22].

A técnica ultrassônica da birrefringência acústica proposta para o trabalho avalia tensões residuais utilizando transdutores do tipo reto ou normal de onda cisalhante. A seguir a Figura 8 ilustra um transdutor ultrassônico reto [22].

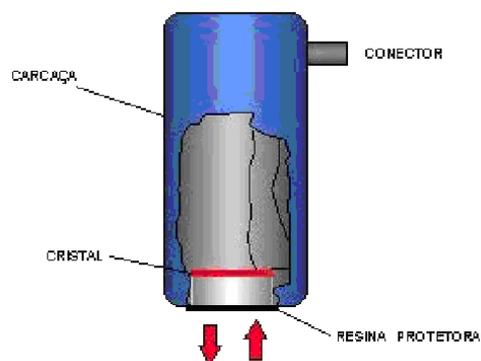


Figura 8 – Desenho esquemático de um transdutor reto ou normal [22]

## **2.5 – A TÉCNICA ULTRASSÔNICA NA AVALIAÇÃO DE TENSÕES**

Embora vários tipos de onda ultrassônica possam ser usados na acustoelasticidade, o método da birrefringência acústica é o mais conveniente para uso prático porque ele requer a medição da diferença do tempo de trânsito (percurso) de duas ondas ultrassônicas cisalhantes e evita erros decorrentes de variações de espessura [23].

A avaliação ultrassônica de tensões residuais baseia-se no chamado efeito acustoelástico, isto é, na dependência da variação da velocidade acústica da onda ultrassônica com a deformação num material anisotrópico [1 e 16]. Como a birrefringência ótica, a birrefringência acústica usa a diferença da velocidade entre as ondas cisalhantes se propagando na mesma direção, porém, polarizadas em ângulos retos para medir a diferença de tensão entre as duas direções de polarização. Para chapas ou paredes de dutos, a quantidade medida é a diferença em tempo de trânsito para duas ondas cisalhantes atravessarem a dimensão da espessura da chapa [9]. A maneira mais fácil de estabelecer a sensibilidade absoluta deste método é fazer medições de velocidade no material sob tensão ou compressão uniaxial [1].

A Figura 9 ilustra as cinco diferentes combinações de velocidade de onda e polarização que podem ser consideradas em um meio isotrópico num sistema de coordenadas Cartesiano, alinhadas com as direções das tensões principais [1].

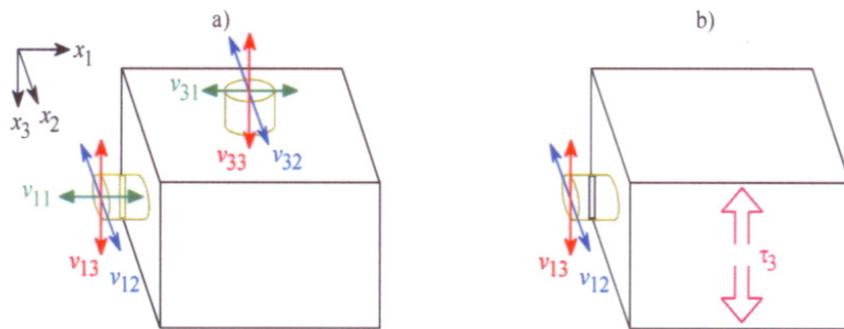


Figura 9 – (a) As cinco diferentes combinações de velocidade da onda e polarização que podem ser consideradas num meio isotrópico e (b) o caso especial da birrefringência [1]

Num material isotrópico e livre de tensão as velocidades de propagação características das ondas elásticas para o material não variam e dependem, fundamentalmente, das constantes elásticas de segunda ordem do meio e, portanto, da sua simetria estrutural. As velocidades da onda longitudinal ( $V_L$ ) e da onda transversal ( $V_T$ ) são dadas respectivamente por [16 e 24]:

$$\rho V_L^2 = \lambda + 2\mu \quad (2a) [16 \text{ e } 24]$$

$$\rho V_T^2 = \mu \quad (2b) [16 \text{ e } 24]$$

onde  $\rho$  é a densidade do material. As constantes elásticas de segunda ordem  $\lambda$  e  $\mu$  são também chamadas de constantes de Lamé. As constantes elásticas usadas usualmente em engenharia são os módulos de Young [ $E = \mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu)$ ] e de Cisalhamento [ $G = \mu$ ], [16 e 24].

Se o sólido é isotrópico, mas está sujeito a um estado de tensão, as propriedades elásticas são modificadas e a isotropia é perdida. As velocidades das ondas elásticas tornam-se dependentes do estado de deformação. No caso geral de um estado tridimensional de deformações, as velocidades acústicas no antigo sólido isotrópico com a estrutura cúbica são dadas por Hughes and Kelly [16]:

$$\rho V_{ii}^2 = \rho V_L^2 + (2l + \lambda)(\varepsilon_i + \varepsilon_j + \varepsilon_k) + (4m + 4\lambda + 10\mu)\varepsilon_i \quad (3a) [16]$$

$$\rho V_{ij}^2 = \rho V_T^2 + (\lambda + m)(\varepsilon_i + \varepsilon_j + \varepsilon_k) + 4\mu\varepsilon_i + 2\mu\varepsilon_j + 0,5n\varepsilon_k \quad (3b) [16]$$

$$\rho V_{ik}^2 = \rho V_T^2 + (\lambda + \mu)(\varepsilon_i + \varepsilon_j + \varepsilon_k) + 4\mu\varepsilon_i + 0,5n\varepsilon_j + 2\mu\varepsilon_k \quad (3c) [16]$$

O primeiro índice de  $V$  representa a direção de propagação da onda, e o segundo a direção de polarização (vibração das partículas).  $i, j$  e  $k$  são os eixos das tensões principais,  $\varepsilon_i, \varepsilon_j$  e  $\varepsilon_k$  são os elementos da deformação normalizada.  $l, m$  e  $n$  são as constantes elásticas de terceira ordem do material em consideração, também chamadas de constantes de Murnaghan.  $V_{ii}$  é a velocidade de uma onda longitudinal se propagando na direção  $i$ ;  $V_{ij}$  e  $V_{ik}$  são as velocidades de duas ondas cisalhantes polarizadas perpendicularmente uma em relação a outra [16].

As equações desenvolvidas por Hughes e Kelly podem apresentar de maneira genérica a variação da velocidade da onda ultrassônica em relação à tensão, da seguinte forma [25]:

Para as ondas cisalhantes,

$$\frac{V_{ij} - V_T^0}{V_T^0} = k_3 \sigma_i + k_4 \sigma_j + k_5 \sigma_k \quad (4) [25]$$

Onde  $V_T^0$  é a velocidade da onda cisalhante no material sem tensão,  $V_{ij}$  é a velocidade de uma onda ultrassônica propagando na direção  $i$  e polarizada na direção  $j$ .  $\sigma_i$ ,  $\sigma_j$  e  $\sigma_k$  são as tensões principais nas respectivas direções e de  $k_3$  a  $k_5$  são chamadas de constantes acustoelásticas. Para cada constante acustoelástica existe uma relação correspondente entre as direções de propagação da onda e de polarização das partículas em relação à tensão e são obtidas a partir da variação relativa da velocidade das ondas em um material tensionado uniaxialmente, assumindo variações muito pequenas [25].

Num material isotrópico sem os efeitos de tensão ou textura, uma onda ultrassônica cisalhante incidindo perpendicularmente e se propagando em um mesmo volume de material, quando polarizada em duas direções perpendiculares, retornará no mesmo tempo. Se a este material é aplicada uma tensão isso não ocorre e a equação genérica da onda cisalhante, a equação 4, é combinada para as duas direções, podendo ser expressa assim [14]:

$$B = \frac{V_{31} - V_{32}}{V_T^0} = (k_4 - k_5)(\sigma_i - \sigma_j) \quad (5) [14 \text{ e } 26]$$

onde  $B$  é a birrefringência acústica do material,  $k_4$  e  $k_5$  são as constantes acustoelásticas do material tensionado. A birrefringência acústica é definida como a diferença fracional da velocidade ou do tempo de percurso das duas ondas ultrassônicas cisalhantes com direções de polarização ortogonais entre si, indicando o grau de anisotropia do material [14], conforme equação a seguir:

$$B = \frac{\frac{V_l - V_t}{V_l + V_t}}{2} = \frac{t_l - t_t}{t_l + t_t} \quad (6) [26]$$

onde  $V_l$  é a velocidade da onda ultrassônica cisalhante com a direção de polarização alinhada com a de laminação,  $V_t$  é a velocidade da onda ultrassônica cisalhante com

a direção de polarização transversal a de laminação,  $t_l$  é o tempo de percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização alinhada com a de laminação do material e  $t_t$  o tempo de percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização perpendicular a de laminação.

Um material ortotrópico é aquele que tem propriedades de simetria elástica em relação a três planos cristalinos. O caso de chapas metálicas pode ser citado como exemplo, pois elas apresentam uma textura onde muitos grãos são arranjados com certos eixos cristalográficos paralelos à direção de laminação. Além disso, esta direção e a ortogonal a ela no plano da chapa são duas direções de simetria ortotrópica. Este tipo de ortotropia existe e foi estudado em chapas de alumínio e aço usando ondas cisalhantes, onde as direções de laminação e a ortogonal a ela são direções de simetria do material [14].

Materiais completamente isotrópicos geralmente não são encontrados, o que pode influenciar na medida de tensão por ultrassom, pois uma pequena variação na orientação dos grãos pode produzir anisotropia acústica da ordem da produzida pela tensão. Outro fato que pode ocorrer são os eixos das tensões principais não estarem perfeitamente alinhados com o eixo de simetria do material. Desse modo, Iwashimizu propõe para o caso em que ocorre um desvio da direção de polarização, equações da técnica da birrefringência, no estado plano de tensões, escritas da forma mais geral [14]:

$$B^2 = [B_0 + A(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})]^2 + [2A\sigma_{xy}]^2 \quad (7) [14 \text{ e } 26]$$

$$\tan 2\phi = \frac{2A\sigma_{xy}}{B_0 + A(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})} \quad (8) [14 \text{ e } 26]$$

onde  $\phi$  é o ângulo entre a direção de simetria do material e a direção de carregamento. B é a birrefringência,  $B_0$  é a birrefringência inicial (induzida pela textura e sem carga), A é um parâmetro do material (constante acústica de tensão) relacionada à constante acustoelástica, e é assumido como  $A = (K_4 - K_5)$  [23].  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xy}$  e  $\sigma_{yy}$  são as tensões no plano de simetria do material. A Figura 10 a seguir, mostra essas direções e ajuda a compreender as equações acima.

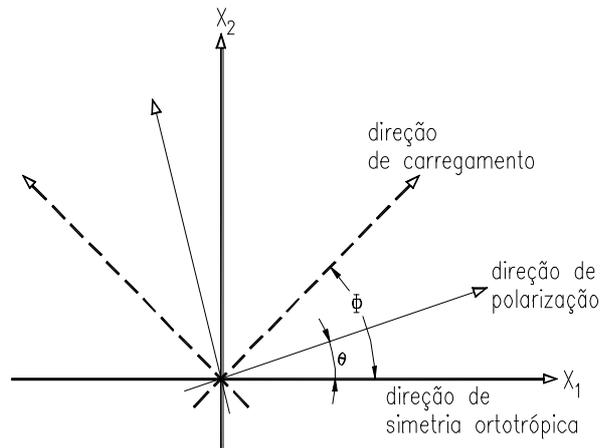


Figura 10 – Esquema com as direções de tensão (direção do carregamento), de polarização e de simetria ortotrópica e seus respectivos ângulos usadas pela teoria da birrefringência [14 e 26].

No caso em que a tensão cisalhante for igual à zero ( $\sigma_{xy} = 0$ ), então  $\phi = 0$ , o que significa que as direções das tensões principais coincidem com as direções de simetria ortotrópica do material e as equações anteriores são reduzidas a:

$$B = B_0 + A(\sigma_i - \sigma_j) \quad (9) \text{ [14 e 26]}$$

onde  $B$  é a birrefringência induzida pelo fator microestrutural e pelo estado de tensão do material,  $B_0$  é birrefringência induzida apenas pelo fator microestrutural, ou seja, na condição em que o material não sofreu efeito da tensão,  $A$  é definida como a constante acustoelástica do material e  $\sigma_i$  e  $\sigma_j$  são as tensões principais. A constante acustoelástica  $A$ , representa o comportamento das diversas constantes acustoelásticas do material pelo efeito da tensão. Ela, como se observa, é fator determinante para a obtenção de tensões pela técnica ultrassônica da birrefringência acústica [27].

Como a técnica ultrassônica emprega medidas do tempo de percurso da onda em aplicações como na determinação da direção de laminação e do tamanho de grão de materiais metálicos, da porosidade em materiais cerâmicos e, na caracterização do estado de tensões em materiais, uma medida muito precisa é necessária, principalmente no caso da avaliação de tensões em materiais onde as variações que ocorrem são da ordem de nanossegundos (ns) [6 e 28]. Bittencourt et al [28] desenvolveram uma técnica para a medição do tempo de percurso da onda

ultrassônica. O sinal ultrassônico gerado é capturado e um programa foi desenvolvido usando processamento matemático de um algoritmo de correlação cruzada e a técnica de interpolação multitaxas, permitindo um refinamento das medidas obtidas [14 e 28].

A avaliação dos níveis de tensão e/ou deformação geradas nas etapas dos processos de conformação na fabricação e/ou por danos causados por forças externas, em qualquer região de um duto, usando a técnica ultrassônica da birrefringência acústica como meio de avaliação não destrutivo, mostrou grandes avanços nos últimos tempos. A dificuldade maior ainda encontrada é na avaliação de um tubo com solda, pois experiências já mostraram que numa avaliação na direção circunferencial, ocorre uma variação das velocidades de propagação das ondas nos pontos dispostos radialmente causada pela anisotropia, dificultando uma avaliação imediata precisa e segura [5, 6, 8 e 27]. Já num tubo sem solda foi observado um comportamento acústico diferente, pois numa única experiência realizada a avaliação acustoelástica apontou para uma possível isotropia acústica [27].

Logo, é importante conhecer os materiais utilizados na fabricação de tubos bem como os processos de fabricação.

Nas últimas décadas nas áreas de pesquisa e desenvolvimento da técnica ultrassônica da birrefringência acústica na análise de tensões residuais, ocorreram grandes avanços, pois muitas informações importantes foram obtidas e bem-vindas ao desenvolvimento da técnica. A necessidade de equipamentos de última geração com velocidade de resposta e de processamento imediata, para se ter um sistema de alto nível de precisão e seguro, faz com que a atualização dos mesmos seja uma constante. Trabalhando com o processamento de sinal para obtenção dos tempos de percursos da velocidade das ondas ultrassônicas da ordem de nanossegundos e no cálculo das birrefringências em cada ponto determinado para estudo num corpo de prova, o uso inesgotável de recursos matemáticos, estatísticos e eletrônicos, converge na busca de resultados cada vez mais precisos, rápidos e garantidos.

### **2.5.1 – O SISTEMA ULTRASSÔNICO**

O sistema ultrassônico (Figura 11) usado com a técnica da birrefringência acústica na avaliação de tensões consta de:

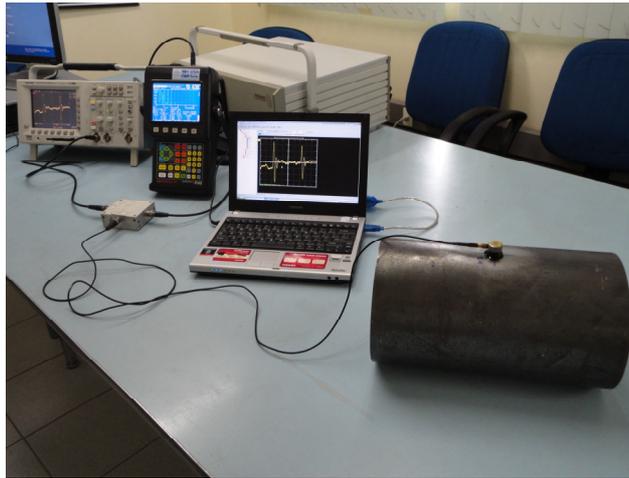


Figura 11 – Sistema Ultrassônico

- **Gerador de pulso ultrassônico (Figura 12)**

Pode ser usado um aparelho de ultrassom ou uma placa geradora receptora de sinais ultrassônicos acoplada num microcomputador;



Figura 12 – Aparelho de ultrassom modelo EPOCH4 PLUS da PANAMETRICS

- **Filtro (Figura 13)**

Acessório eletrônico utilizado para reduzir a tensão (voltagem) entre o transdutor ultrassônico e o osciloscópio evitando danos;

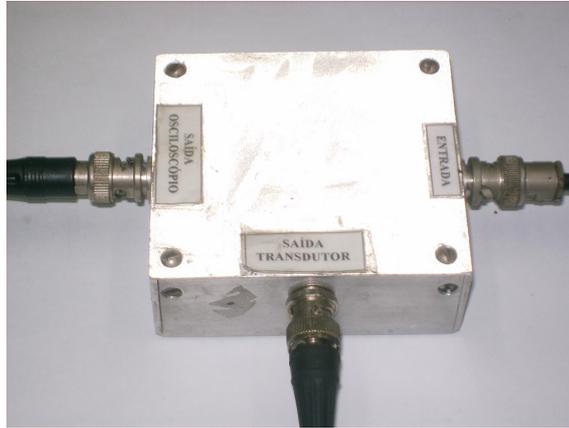


Figura 13 – Filtro de redução de tensão

- **Osciloscópio (Figura 14)**

Equipamento eletrônico utilizado na captura do sinal do tempo de percurso da onda ultrassônica;

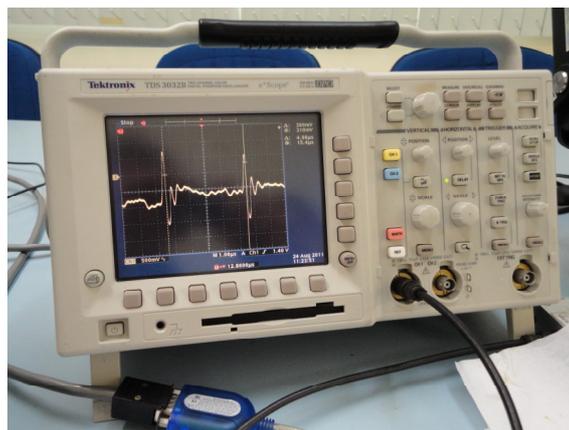


Figura 14 – Osciloscópio modelo TDS3032 da TEKTRONIX



## 2.5.2 – A PRÁTICA DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA

Na amostra em análise são selecionadas e marcadas as regiões e os respectivos pontos a serem inspecionados, sobre os quais o transdutor é posicionado para a captura dos sinais ultrassônicos pelo sistema. O transdutor é acoplado na amostra em estudo usando o acoplante especial SWC (Shear Wave Couplant) e após a obtenção do perfeito acoplamento o transdutor é posicionado de maneira que a polarização das partículas seja paralela ao sentido de laminação da amostra (Posição 1 do transdutor – Figura 17). Após a captura do tempo de percurso da onda neste sentido de polarização o transdutor é girado 90° para que a polarização seja perpendicular a direção inicial (Posição 2 do transdutor – Figura 17).

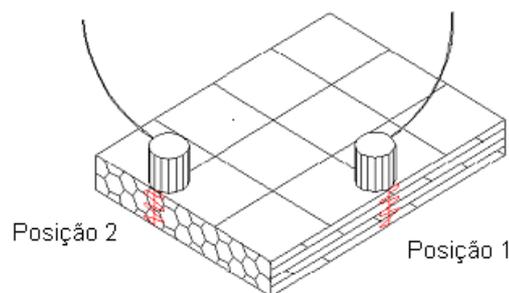


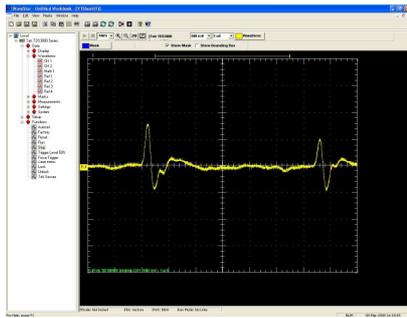
Figura 17 – Direção de polarização (movimento das partículas)

Posição 1 – paralela a direção de laminação (longitudinal)

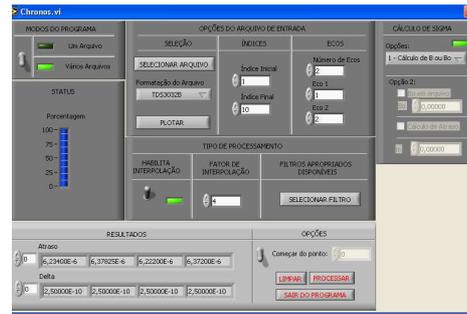
Posição 2 – transversal a direção de laminação

Assim que os sinais com os tempos de percurso das ondas ultrassônicas são capturados na tela do osciloscópio, imediatamente são transferidos para o microcomputador usando o programa WaveStar for Oscilloscope da Tektronix (Figura 18a). Após a obtenção de todos os tempos em pares no ponto em avaliação, a mesma operação é realizada em cada um dos outros pontos a serem avaliados.

O problema da interferência da temperatura é eliminado uma vez que o tempo de captura nos dois sentidos de polarização é realizado praticamente no mesmo instante. Após a obtenção de todos os tempos de percurso das ondas em todos os pontos em estudo, os dados são colocados e processados no programa CHRONOS desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), e são obtidos os tempos de percurso das ondas e as birrefringências de cada ponto (Figura 18b).



(a)



(b)

Figura 18 – Telas dos programas de: (a) Captura do sinal ultrassônico (WaveStar for Oscilloscope) e (b) Processamento do sinal (CHRONOS/IEEN)

Para o levantamento da constante acustoelástica do material, é realizado um ensaio de carregamento uniaxial num corpo de prova do material em avaliação e são capturados os tempos de percurso da onda em várias cargas até o escoamento ser iniciado (Figura 19). Estes sinais capturados são processados para cada carga de levantamento e ao final, com a birrefringência em cada carga é montado o gráfico Tensão x Birrefringência, como pode ser visto no exemplo da Figura 20 para cinco corpos de prova retirados de um tubo de aço API-5LX-70 [5].



Figura 19 – Ensaio ultrassônico e de carregamento uniaxial de um corpo-de-prova sendo realizados na Máquina de Ensaio Universal da empresa APOLO TUBULARS

A constante acustoelástica é dada pelo coeficiente angular da reta traçada pelos pontos no gráfico.

O ideal para o uso desta técnica é obter o valor da birrefringência do material sem as tensões residuais geradas pelo processo de fabricação dos dutos, pois se terá em mãos o valor da birrefringência inicial ( $B_0$ ) e com este valor e o da birrefringência em cada ponto avaliado da amostra em estudo aplicando-se a Equação 9 é determinado o valor da tensão em cada ponto.

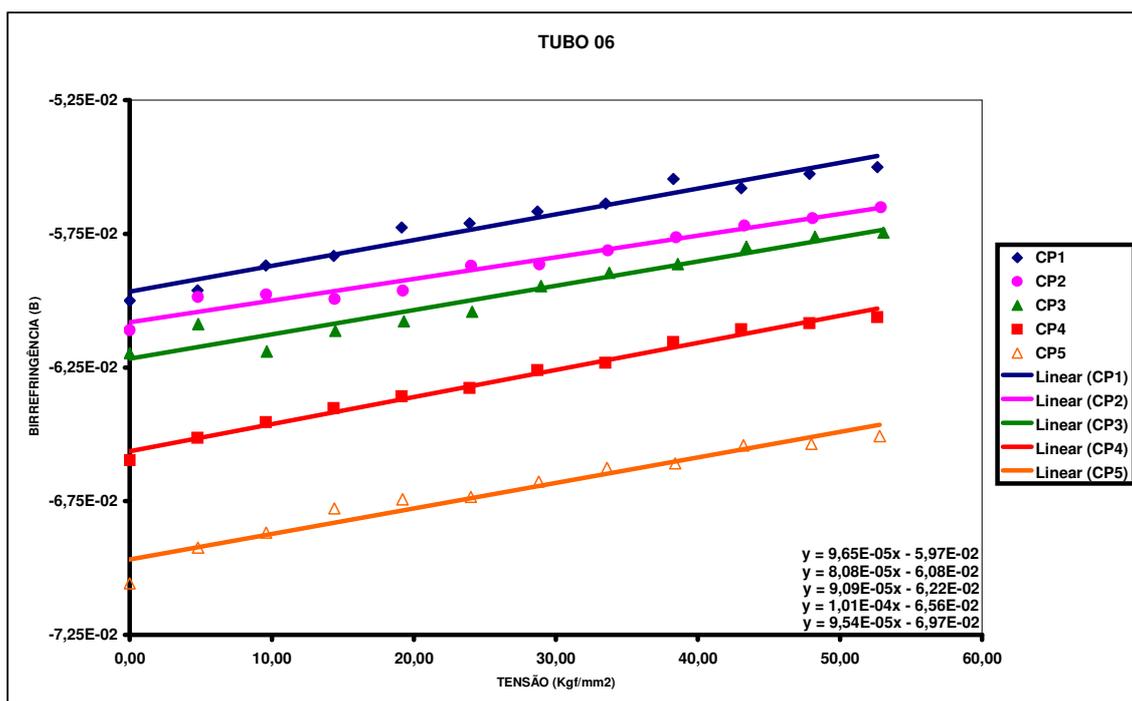


Figura 20 – Variação da birrefringência em função da tensão aplicada nos CP's no tubo 06 (API-5LX-70-SAW) e suas respectivas constantes acustoelásticas [8]

## 2.6 – TUBOS LINE PIPE E OCTG

Para atender as funções de prospecção, extração, transporte e distribuição, são produzidos tubos com ou sem solda, com as composições químicas e propriedades mecânicas seguras, tolerâncias dimensionais, atendendo normas rígidas como da American Petroleum Institute (API) e da International Organization for Standardization (ISO), com foco marcante sobre a especificação do produto final com segurança de uso [29]. Visando atender este objetivo existem muitos desafios cujos principais são:

- Obtenção de estreitas faixas de propriedades mecânicas nos tubos, pois o processo de fabricação causa variação destas propriedades no tubo produzido em relação às obtidas pela matéria-prima inicial [29];
- Excelente controle de qualidade da matéria-prima, mantendo um baixo nível de inclusões e impurezas, especialmente enxofre (S), fósforo (P) e até mesmo nitrogênio (N) e oxigênio (O) [29];
- Juntas soldadas homogêneas em relação ao metal de base utilizado, no caso de tubos com solda [29];
- E finalmente características dimensionais e geométricas com perfeito controle visando à homogeneidade aos tubos [29].

### 2.6.1 – TUBOS PARA CONDUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO / LINE PIPE

Os tubos do tipo LINE PIPE, são utilizados na condução e distribuição de gás natural, petróleo e seus derivados e as especificações de materiais da API para estes tubos são a seguir tratadas.

- **API 5L** – para tubos de qualidade média, com ou sem costura, de 1/8” a 64” de diâmetro nominal, em dois graus de material, A ,B e C.
- **API 5LX** – para tubos com ou sem costura, de aço-carbono de alta resistência, especial para oleodutos e gasodutos, abrangendo os oito seguintes graus de material, com os seus respectivos valores mínimos dos limites de resistência e de escoamento, conforme a Tabela 1:

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas dos aços API 5LX [30]

Graus	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)
X42	412	284
X46	431	314
X52	451	353
X56	490	382
X60	509	412
X65	529	441
X70	569	480
X80	618	549

Estritamente falando, os tubos dos graus X-56 a X-80 não são de aço carbono como os demais citados acima, e sim de aços de baixa liga, porque tem pequenas quantidades de titânio (Ti), vanádio (V) e nióbio (Nb) [30].

Os aços grau API combinam alta resistência mecânica à tração com elevadas propriedades de impacto, o que os fazem adequados para a fabricação de componentes de grande espessura, como tubulações usadas em gasodutos que devem possuir uma temperatura de transição a mais baixa possível bem como um elevado patamar superior de energia de impacto, já que as elevadas tensões de serviço podem contribuir para a ocorrência de falha no modo dúctil de propagação de trinca. Obviamente, as juntas soldadas com estes aços também devem possuir elevadas propriedades de impacto. Na América Latina, recentemente, começa-se a fazer uso de tubos soldados em espiral para aplicação em dutos sujeitos a altas pressões [31].

### **2.6.2 – TUBOS PARA EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO / OCTG**

Os tubos OCTG (Oil Country Tubular Goods), são utilizados em poços de petróleo e gás na perfuração e na extração, e podem ser classificados nos três tipos listados a seguir:

- Tubos de perfuração (Drilling) são utilizados para a perfuração de poços, sendo necessária resistência à abrasão, fadiga e corrosão-fadiga;
- Tubos de revestimento (Casing) são inseridos nas perfurações e assentados com cimento;
- Tubos de produção (Tubing) são posicionados dentro dos tubos de revestimento e utilizados para a extração de óleo e gás, assim como no transporte de fluidos hidráulicos para o acionamento de equipamentos [29].

Algumas especificações de materiais para tubos OCTG do American Petroleum Institute (API):

- **API 5CT** – A norma API 5CT / ISO 11960 - Petroleum and natural gas industries - Steel pipes for use as casing or tubing for wells (API, 2004) especifica as condições técnicas de entrega de tubos de aço com ou sem costura destinados a revestimento (Casing) e produção (Tubing) de poços de

petróleo. A seguir a Tabela 2 contendo os graus conforme a norma e seus limites mínimos de resistência e escoamento [32].

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas dos aços API 5CT [32]

Graus	Limite de Resistência Mínimo (MPa)	Limite de Escoamento Mínimo (MPa)
H40	414	276
J55	517	379
K55	655	379
L80	655	552
M65	586	448
N80	689	552
C90	689	621
C95	724	655
T95	724	655
P110	862	758
Q125	931	862

Devido à exploração e produção de petróleo e gás acontecer em condições cada vez mais desafiadoras, com perfurações mais profundas e em regiões com condições geológicas complexas [33], e elevadíssimas pressões é necessário ter em mãos para se trabalhar nestas áreas, tubos com qualidades excepcionais e que transmitam total confiança (elevado grau de resistência ao colapso e a flambagem). Atualmente, os poços chegam a atingir profundidades superiores a 6 mil metros e as condições, cada vez mais severas e pressões altíssimas, exigem grande resistência dos materiais aplicados [34].

Na atualidade a necessidade de poços de petróleo e gás cada vez mais profundos, enfrentando pressões sempre crescentes, temperaturas mais elevadas e ambientes corrosivos, aumenta também as exigências quanto ao desempenho dos produtos tubulares, com requisitos cada vez mais severos. Assim, tubos OCTG estão em constante desenvolvimento com diferentes teores de aço, composições químicas e propriedades mecânicas tais como alta dureza, resistência à fadiga, à corrosão, ao rompimento e ao colapso [35]. Uma ampla gama de graus proprietários de aço, visando atender as condições de trabalho em ambientes críticos, conforme descrição a seguir [36]:

- **Ambientes ácidos** → Para ambientes severamente corrosivos, com maior resistência a trincas induzidas por corrosão de sulfetos sob tensão;
- **Alto colapso** → Para poços que apresentam altas pressões externas, pela otimização do desempenho de colapso dos tubos;
- **Ambientes ácidos e alto colapso** → Para poços de petróleo e gás que apresentam altas pressões externas em ambientes severamente corrosivos.
- **Poços profundos** → Para poços profundos que requeiram resistência adicional com boa ductilidade e elasticidade.
- **Serviços críticos** → Para ambientes específicos com CO<sub>2</sub>, provendo uma alternativa econômica em aço carbono opcional para corrosão doce, onde ligas resistentes à corrosão não se justificam economicamente.
- **Serviços em baixa temperatura** → Graus proprietários com resistência à fratura melhorada para utilização em baixas temperaturas (regiões árticas) [36].

#### **2.6.2.1 – RESISTÊNCIA DE UM TUBO OCTG DO TIPO CASING AO COLAPSO**

Uma das mais importantes considerações envolvidas no projeto de tubos OCTG do tipo Casing, usados no revestimento de poços profundos de óleo e gás, é quanto à resistência ao colapso, quando grandes pressões hidrostáticas atuam sobre a superfície externa. Nas profundidades onde o Casing normalmente é colocado, o grande risco de colapso determina a seleção do Casing do ponto de vista da espessura de parede e das propriedades mecânicas do material a partir do qual é feito o tubo [37].

O colapso de tubos é um caso típico de falha por instabilidade. A Engenharia de Projetos distingue dois casos de falha por instabilidade: o caso elástico no qual a falha ocorre sob deformação elástica, e o caso plástico no qual a falha é precedida pela deformação permanente da estrutura. A resistência ao colapso de um tubo do tipo Casing depende de um número de fatores importantes enumerados a seguir [37]:

- a. a relação do diâmetro ( $D$ ) com a espessura da parede ( $e$ ) do tubo;
- b. a forma da curva tensão-deformação do material do tubo;
- c. a presença de tensão residual nas paredes dos tubos;
- d. ovalização e variações da espessura da parede (excentricidade);
- e. e as tensões axiais devido às forças atuando na direção axial do tubo [37].

No caso em estudo foi dada atenção ao item c, que trata da presença de tensão residual nas paredes de tubos antes e após das etapas de fabricação de tratamento térmico de têmpera/revenido e de desempenho a quente. O efeito da tensão residual sobre a resistência ao colapso de um tubo OCTG do tipo Casing é visto a seguir.

#### **2.6.2.2 – EFEITO DA TENSÃO RESIDUAL SOBRE A RESISTÊNCIA AO COLAPSO**

Uma análise da distribuição de tensão no interior da parede de um tubo OCTG do tipo Casing sujeito a pressão externa ou interna, mostra que a tensão circunferencial existente não é uniformemente distribuída. Num tubo deste tipo, sob pressão interna ou externa, a intensidade da tensão circunferencial na sua superfície interna é consideravelmente maior do que na sua superfície externa. Deste modo, quando o mesmo está sob pressão, o material alcança o ponto de escoamento na superfície interna do tubo antes que na superfície externa. Assim, um tubo do tipo Casing contendo tensões residuais compressivas na superfície interna (presença de tensões residuais trativas na superfície externa), têm a sua resistência ao colapso reduzida já que na superfície interna o material alcança a tensão de escoamento num valor menor de pressão de colapso do que aquele se nenhuma tensão residual estivesse presente [38].

A taxa de resfriamento não uniforme inerente à maioria das operações de têmpera, induz tensão residual no material do tubo Casing. O grau de intensidade destas tensões geradas pela têmpera é influenciado pela composição química e pela espessura da parede do Casing, bem como pelo processo de têmpera empregado pelo fabricante [38].

O termo “Slack Quenching” é usado para descrever o gradiente do tratamento térmico encontrado durante a têmpera de um Casing com material de baixa qualidade química [38].

O uso deste tipo de material ou de uma taxa lenta de resfriamento durante o processo de têmpera na fabricação de um tubo do tipo Casing, pode resultar num gradiente de tratamento térmico dentro da espessura da parede do tubo. Isso causa uma completa transformação martensítica do material na parte externa da parede e uma transformação parcial do material próximo à parte interna da parede do Casing. Assim a microestrutura resultante teria uma variação de resistência de alta resistência

na parte externa para baixa resistência na parte interna da parede do tubo do tipo Casing. O processo de desempenho de tubo do tipo Casing é a principal fonte de tensão residual empregada pela maioria dos fabricantes, depois do processo de tratamento térmico de têmpera. Qualquer tipo de método de desempenho gera tensão residual no material do Casing que sofre esta operação [38].

A Tabela 3 a seguir que mostra a faixa e a natureza das tensões residuais circunferenciais encontradas em vários graus de Casings em duas situações, antes do desempenho devido ao processo de têmpera, e depois do desempenho rotativo. O interessante é que a maior porção de tensão residual ocorre devido à operação de desempenho [38].

Tabela 3 – Tensões residuais em tubos do tipo Casing antes e após o desempenho [38]

<b>MAGNITUDE E NATUREZA DAS TENSÕES RESIDUAIS EM CASINGS</b>					
<b>ANTES E DEPOIS DA OPERAÇÃO DE DESEMPENO</b>					
Grau	D.Externo (Polegada)	Peso (Lbs/Ft)	D/t	Tensão Residual Média*	
				Antes do Desempeno (Psi)	Depois do Desempeno (Psi)
P-110 (Dados a partir da referência)	9 5/8	47,00	20,39	4.050	23.300
	7 5/8	29,70	20,33	9.920	45.170
	7	26,00	19,33	4.670	34.250
	7 5/8	33,70	17,73	11.200	51.300
	9 5/8	53,50	17,66	-890	39.830
	7	29,00	17,16	2.050	20.850
	7	29,00	17,16	4.600	24.370
	5	15,00	16,89	3.000	32.480
	7	32,00	15,45	0	24.960
	5 1/2	20,00	15,23	-1.950	51.400
	7	35,00	14,06	0	30.470
	5	18,00	13,81	1.590	32.570
N-80 (Dados a partir da investigação)	7 5/8	26,40	23,76	-2.178	25.634
	7 5/8	33,70	18,00	-2.985	13.945

\*Todas as tensões residuais foram medidas pelo método “split-ring” (anel com rasgo). O sinal negativo se refere à tensão compressiva.

### 2.6.3 – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE TUBOS

Existem quatro grupos de processos [30]:

- **Tubos com solda** → Processo de fabricação por solda
- **Tubos sem solda** → Processos de fabricação por laminação, extrusão ou fundição

#### 2.6.3.1 – TUBOS COM SOLDA

São produzidos tubos com solda de aço carbono, aço liga, aço inoxidável e de ferro forjado, em toda a faixa de diâmetros usuais na indústria [30].

Os cordões de solda podem ser realizados de maneira longitudinal ou helicoidal. Os processos de soldagem mais usados são por arco submerso e, por resistência elétrica, sem adição de metal [30].

Nos tubos com solda longitudinal pode ser utilizada uma bobina de chapa enrolada, ou chapas planas. As bobinas são usadas na fabricação contínua de tubos de pequeno e médio diâmetro (até 450 mm), enquanto as chapas planas, na produção de tubos de médio e grande diâmetro. A seguir as Figuras 21 e 22 mostram dois processos de fabricação empregando a solda longitudinal [30].

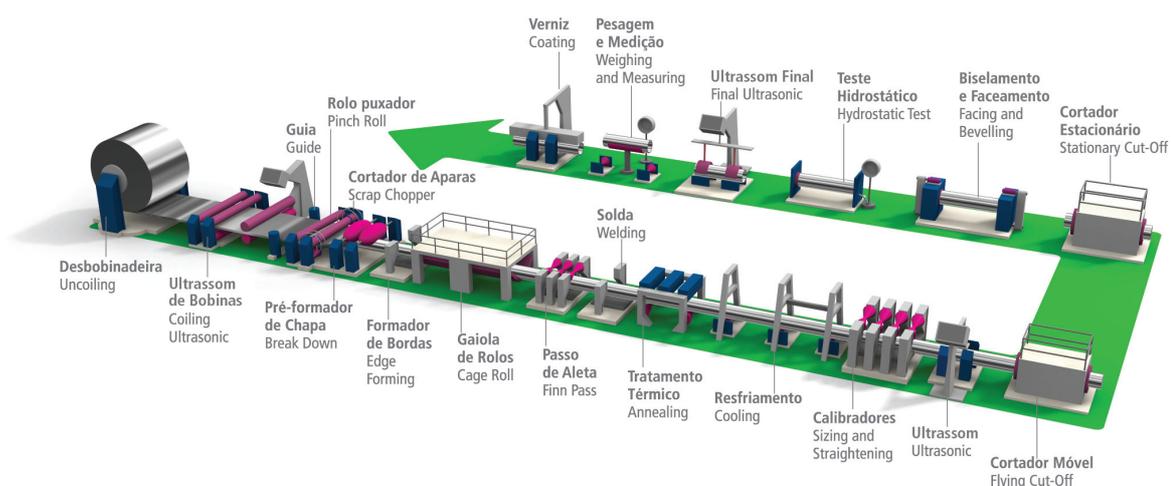


Figura 21 - Fabricação de tubos a partir de bobinas laminadas ERW [39]

Este processo possui:

- Operações de desbobinamento do aço
- Formação dos tubos através de rolos
- Soldagem automática por resistência elétrica em alta frequência
- Normalização da solda
- Calibragem
- Corte e testes hidrostáticos, dimensionais e de laboratório
- Ensaios não destrutivos [39]

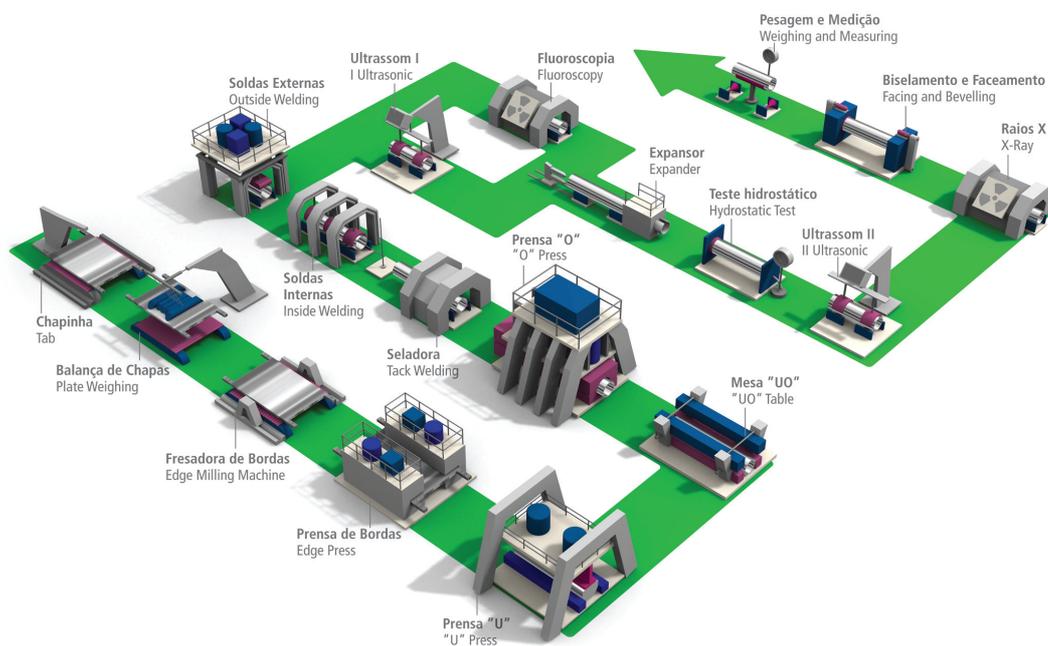


Figura 22 - Processo de fabricação de tubos a partir de chapas laminadas SAW [40]

A partir de chapas de aço, esse processo inclui:

- Prensas "U" e "O"
- Soldagem automática interna e externa por arco submerso
- Expansão a frio
- Testes hidrostáticos
- Ensaios não destrutivos
- Ensaios dimensionais
- Ensaios de laboratório [40]

Já no processo de fabricação de tubos com solda helicoidal, a matéria-prima é sempre uma bobina para fabricação contínua, qualquer que seja o diâmetro do tubo, permitindo a fabricação de tubos sem limitação de diâmetro [30].

Os tubos com solda helicoidal segundo a norma ANSI/ASME B.31, só podem ser usados em serviços de baixa responsabilidade [30]. A seguir, uma figura mostrando este processo de fabricação.

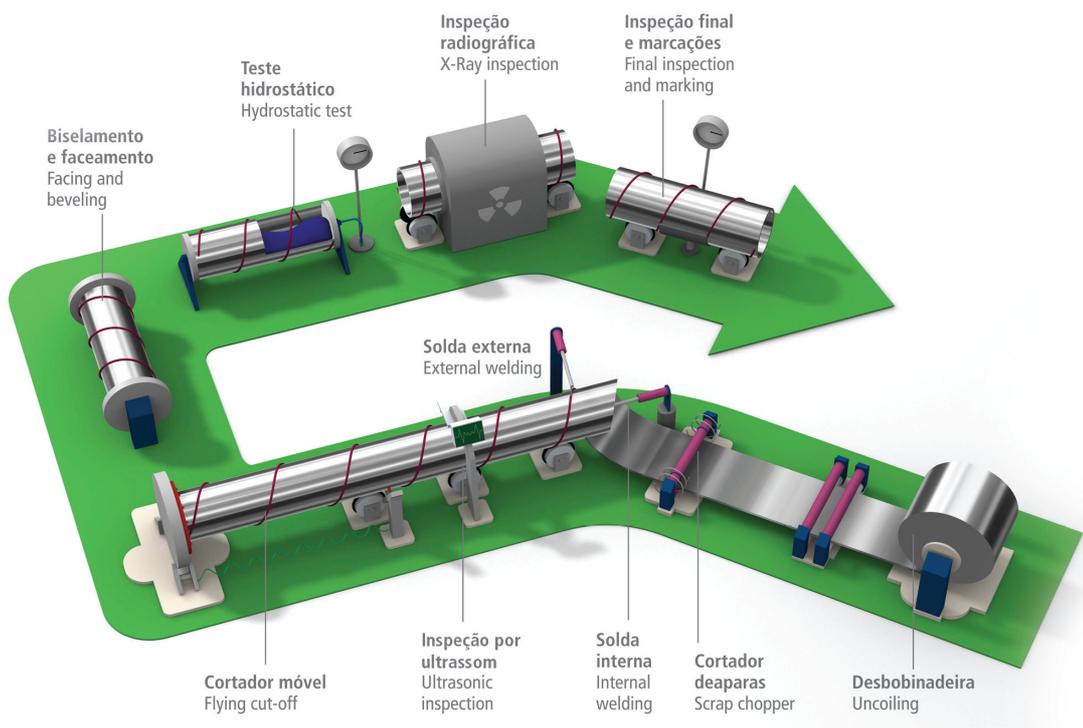


Figura 23 - Processo de fabricação de tubo helicoidal [41]

A partir de bobinas laminadas, esse processo inclui:

- Formação dos tubos por processo contínuo helicoidal
- Soldagem automática por arco submerso
- Testes hidrostáticos
- Ensaios não destrutivos
- Ensaios dimensionais
- Ensaios de laboratório [41]

### 2.6.3.2 – TUBOS SEM SOLDA

Entre os processos para a fabricação de tubos de aço sem solda existentes, os de laminação são os mais importantes. Estes processos são empregados para a fabricação de tubos de aços carbono, aços liga e aços inoxidáveis. Os diâmetros variam de 80 a 650 mm. O processo “Mannesmann” é o mais importante deles, e consiste de um lingote cilíndrico com um diâmetro externo próximo ao final do tubo que vai ser fabricado, que é aquecido a cerca de 1.200°C e conduzido ao laminador oblíquo. Este laminador contém dois rolos de cone duplo, fazendo entre seus eixos um pequeno ângulo (Figura 24) [30].

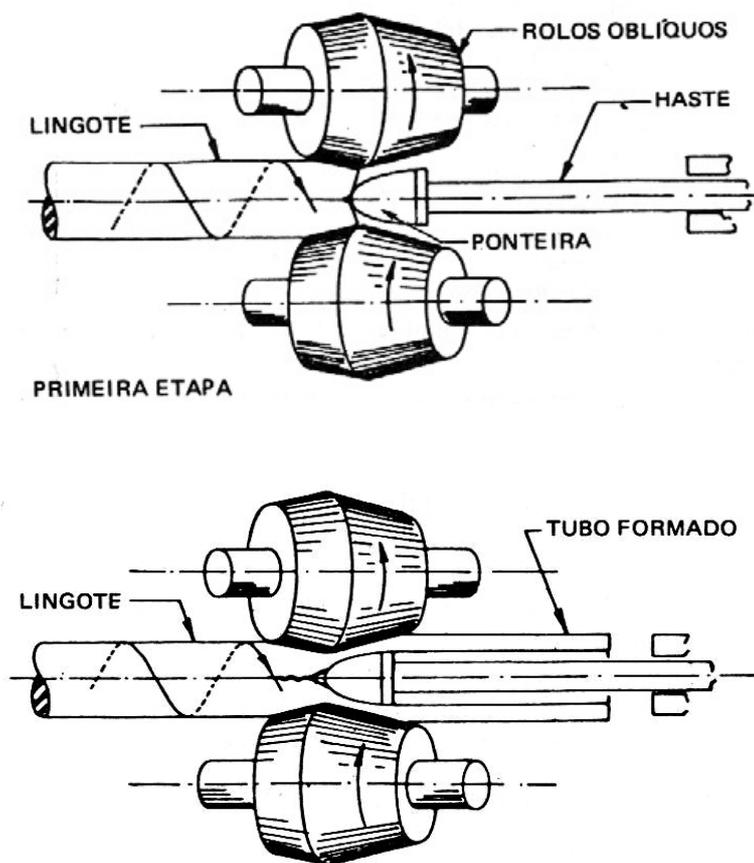


Figura 24 - Fabricação de tubos por laminação -  
Laminador oblíquo “Mannesmann” [30]

Como se vê na Figura 24 o lingote cilíndrico de aço é colocado entre dois rolos, sendo prensado fortemente, e os mesmos imprimem ao mesmo tempo um movimento helicoidal de rotação e translação. Em consequência deste último o lingote é pressionado contra a ponteira cônica localizada entre os rolos. A ponteira abre um furo no centro do lingote, produzindo um tubo e realizando um processo de alisamento

contínuo da superfície interna deste. Essa ponteira é fixa e está localizada na extremidade de uma haste que tem um comprimento maior que o tubo final [30].

O tubo final desta primeira etapa apresenta paredes muito grossas. A seguir, é retirada a ponteira e o tubo é levado para um segundo laminador oblíquo, ainda quente, contendo uma ponteira com o diâmetro um pouco maior, o qual afina as paredes do tubo, conseqüentemente, aumentando o comprimento e ajustando o diâmetro do tubo.

Depois da passagem pelos dois laminadores, o tubo se apresenta bastante empenado. Então ele é passado em duas máquinas desempenadoras de rolos [30].

O tubo em seguida, sofre, finalmente, uma série de passagens em laminadores com mandris e laminadores calibradores para calibragem dos diâmetros externo e interno, e também alisamento das suas superfícies externa e interna (Figura 25) [30].

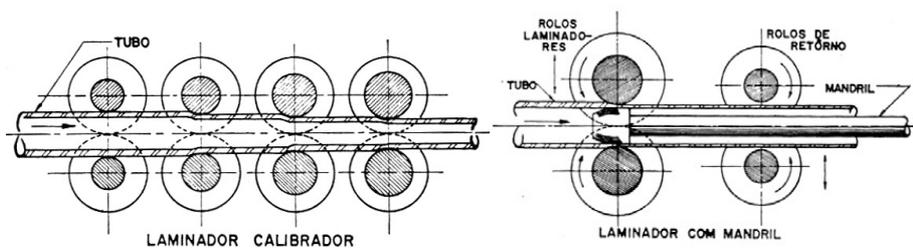


Figura 25 - Laminadores e acabamento [30]

O ciclo de desenvolvimento de novos materiais visando atender as necessidades atuais nas diversas áreas da engenharia como as das redes petrolíferas de exploração e produção (OCTG) como para condução e distribuição (LINE PIPE), é contínuo e dinâmico [42].

Estes novos materiais para tubos de produção (Tubing), de revestimento de poços (Casing), de condução e distribuição (Line Pipes) e acessórios tais como pup joints, x-overs e luvas conforme normas API 5CT e 5L ou fabricados para utilização em ambientes críticos (High Collapse, Sour Service, 13Cr, Super 13Cr) visam atender as necessidades destas redes [43].

## **CAPÍTULO 3 – MATERIAL E METODOLOGIAS**

### **3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo é apresentado o material utilizado na fabricação dos tubos OCTG do tipo Casing API 5CT Grau N80Q avaliados, bem como todas as metodologias aplicadas durante o desenvolvimento do estudo.

### **3.2 – MATERIAL UTILIZADO**

No estudo foi realizada uma avaliação acustoelástica usando a técnica ultrassônica da birrefringência acústica, em seis tubos OCTG do tipo Casing API 5CT Grau N80Q, com solda, obtidos pelo processo de fabricação Electric Resistance Welding / High Frequency Induction Welding (ERW/HFIW) longitudinal contínuo, todos produzidos e fornecidos pela empresa APOLO TUBULARS S.A., localizada na cidade de Lorena/SP. O tubo do tipo Casing é usado no revestimento dos poços de petróleo. Suas dimensões nominais eram: 12.000 mm de comprimento, 178 mm de diâmetro externo e 8,05 mm de espessura. A Figura 26 mostra os seis tubos posicionados sobre cavaletes de aço, numa área selecionada e, exclusivamente separada pela empresa, para a realização do estudo.



Figura 26 – Os seis tubos OCTG do tipo Casing em estudo

A matéria-prima utilizada na fabricação destes tubos foi o aço T-380 da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), fornecido em bobinas de 1.330 mm de largura e 1.530 mm de diâmetro externo (Figura 27).



Figura 27 – Bobinas fornecidas pela CSN sendo posicionadas para o processo de corte e rebobinamento em bobinas com a largura final necessária para atender ao diâmetro final desejado na linha de fabricação

A composição química do material da bobina (aço T-380 da CSN) usado na fabricação dos tubos é mostrada na Tabela 4:

Tabela 4 – Composição do material usado na confecção dos tubos em estudo

<b>ELEMENTO</b>	<b>%</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>%</b>
<b>C</b>	<b>0,226</b>	<b>V</b>	<b>0,001</b>
<b>Mn</b>	<b>1,400</b>	<b>Ti</b>	<b>0,001</b>
<b>P</b>	<b>0,014</b>	<b>B</b>	<b>0,001</b>
<b>S</b>	<b>0,003</b>	<b>Sn</b>	<b>0,006</b>
<b>Si</b>	<b>0,223</b>	<b>Ca</b>	<b>0,002</b>
<b>Cu</b>	<b>0,022</b>	<b>Al</b>	<b>0,031</b>
<b>Ni</b>	<b>0,015</b>	<b>Pb</b>	<b>0,003</b>
<b>Cr</b>	<b>0,031</b>	<b>W</b>	<b>0,010</b>
<b>Mo</b>	<b>0,005</b>	<b>Zn</b>	<b>0,002</b>
<b>Nb</b>	<b>0,003</b>	<b>As</b>	<b>0,007</b>

O limite de escoamento do material é de 40,69 Kgf/mm<sup>2</sup> (399 MPa) e o de resistência é de 62,20 Kgf/mm<sup>2</sup> (610 MPa), determinados no ensaio de tração realizado no CP-L1 conforme item 4.2.

Cada bobina de aço recebida para a produção deste tubo foi seccionada gerando novas bobinas com larguras de dimensões menores para atender aos diâmetros finais desejados para os tubos a serem fabricados. A seguir, a Figura 3 contendo cinco bobinas geradas de uma bobina de aço matriz seccionada.

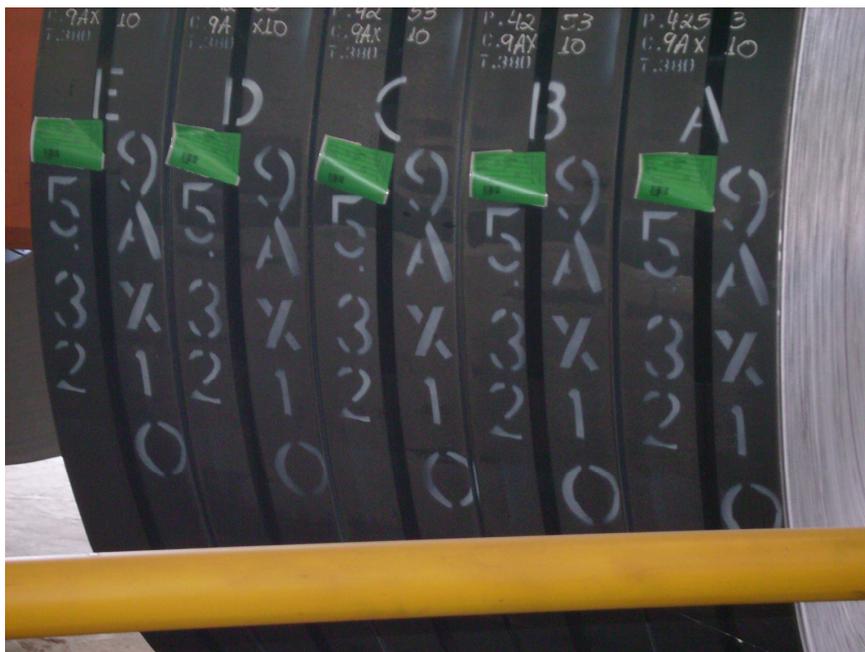


Figura 28 – Conjunto de cinco bobinas com a largura desejada, geradas de uma bobina matriz

Na fabricação dos tubos OCTG, um longo caminho é percorrido desde a etapa de conformação da chapa fornecida em forma de bobina, até o produto final desejado. Um diagrama da linha de fabricação e do controle de qualidade da APOLO TUBULARS S.A., contendo todas as etapas envolvidas na fabricação de tubos OCTG dos tipos Tubing e Casing, é mostrado pela Figura 29 a seguir.

## OCTG – FLUXOGRAMA DE FABRICAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE

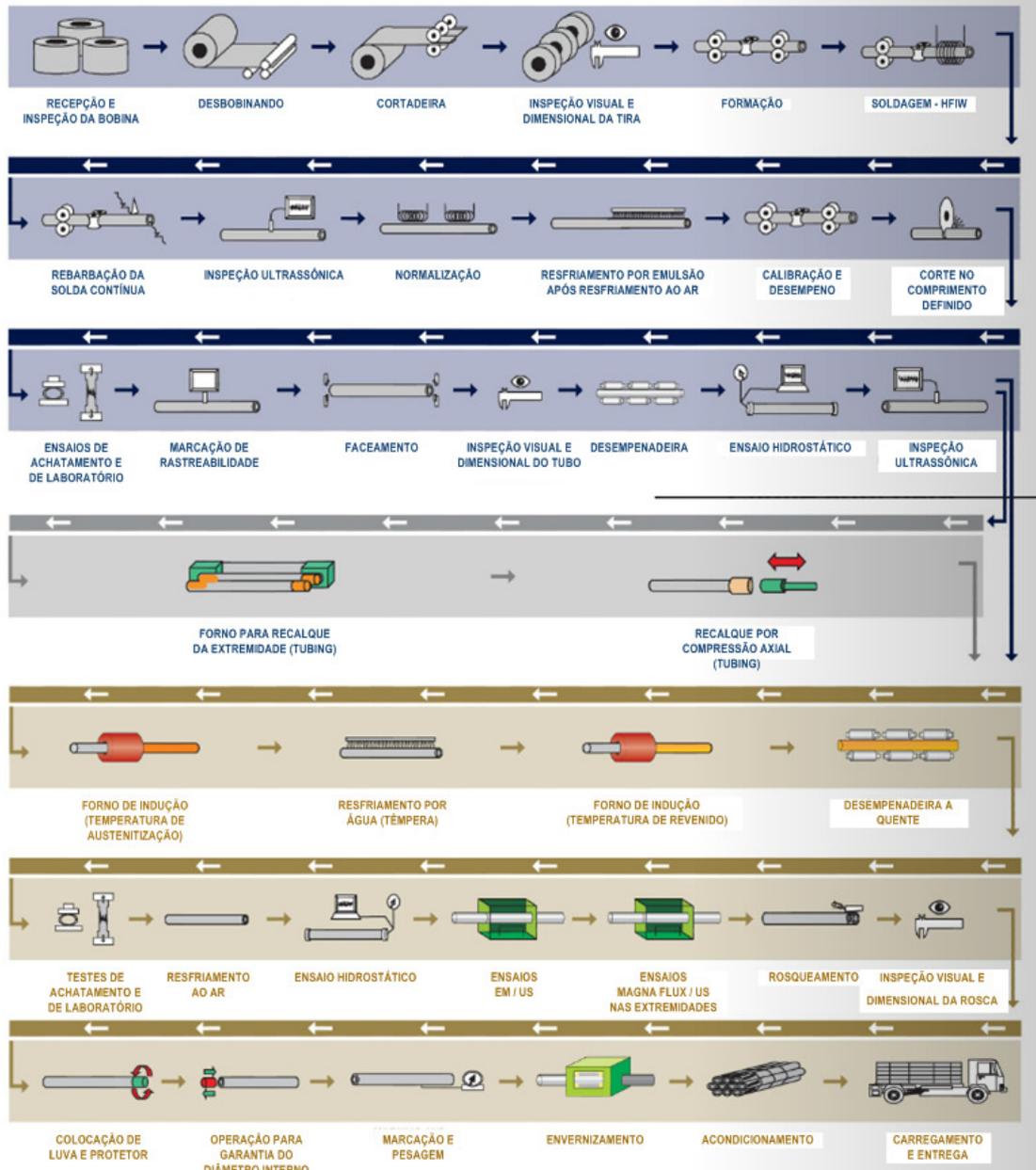


Figura 29 – Fluxograma da linha de fabricação e de controle de qualidade da APOLO TUBULARS S.A. para os tubos OCTG [4]

Após as etapas iniciais da linha de fabricação de conformação, de tratamento térmico de normalização da solda, de desempenho e de corte do tubo no comprimento desejado, são extraídos corpos-de-prova para ensaio de tração por amostragem, das regiões posicionadas a 90° em relação à linha da solda, no sentido longitudinal do tubo, para levantamento das propriedades mecânicas do material. Essa operação de

controle de qualidade também é realizada após a etapa de fabricação de desempenho a quente, que ocorre logo após a de tratamento térmico de têmpera/revenido.

Todos os seis tubos selecionados estavam devidamente identificados, contendo seus números e o da corrida de produção dos tubos como pode ser observado na Figura 30 a seguir. O processo de gravação/identificação utilizado pela empresa é o de micropuncionamento que ocorre logo após a etapa de corte do tubo em seu comprimento final desejado.



Figura 30 – Identificação dos tubos realizada na linha de fabricação por micropuncionamento, mostrando o número do tubo e o código da corrida de produção do tubo

### **3.3 – A TÉCNICA ULTRASSÔNICA NA AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DOS TUBOS EM ESTUDO**

#### **3.3.1 – SISTEMA ULTRASSÔNICO**

Foi utilizado na avaliação acustoelástica realizada nos seis tubos OCTG e em todos os corpos-de-prova utilizados no estudo, um Sistema Ultrassônico composto por um Osciloscópio da marca Tektronix, modelo 3032B de 300 MHz, um aparelho de Ultrassom da marca Panametrics, modelo EPOCH4 PLUS, um filtro eletrônico redutor de tensão de duas saídas (uma de baixa tensão para o osciloscópio e outra de alta tensão para o transdutor ultrassônico), um Notebook da marca TOSHIBA, modelo Satellite M45, e um transdutor ultrassônico piezolétrico de onda cisalhante e incidência normal da marca Panametrics, modelo V154, com a frequência de 2,25 MHz e diâmetro de 12,7 mm. Antes de todas as inspeções serem iniciadas o Sistema Ultrassônico era sempre ligado por uma hora a fim de evitar possíveis imprecisões decorrentes de aspectos eletrônicos.

O acoplante utilizado entre o transdutor ultrassônico e a peça em inspeção foi o Shear Wave Couplant (SWC), apropriado para o tipo de onda ultrassônica cisalhante usada. O acoplante tem a função de evitar a presença de ar entre o transdutor ultrassônico e a peça ou estrutura em inspeção, uma vez que o ar é convencionalmente um meio isolante para a onda cisalhante utilizada pela técnica ultrassônica da birrefringência acústica [6]. A Figura 31 ilustra um desenho esquemático do sistema ultrassônico utilizado.

## ESQUEMÁTICO DO SISTEMA ULTRASSÔNICO USADO NA AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA

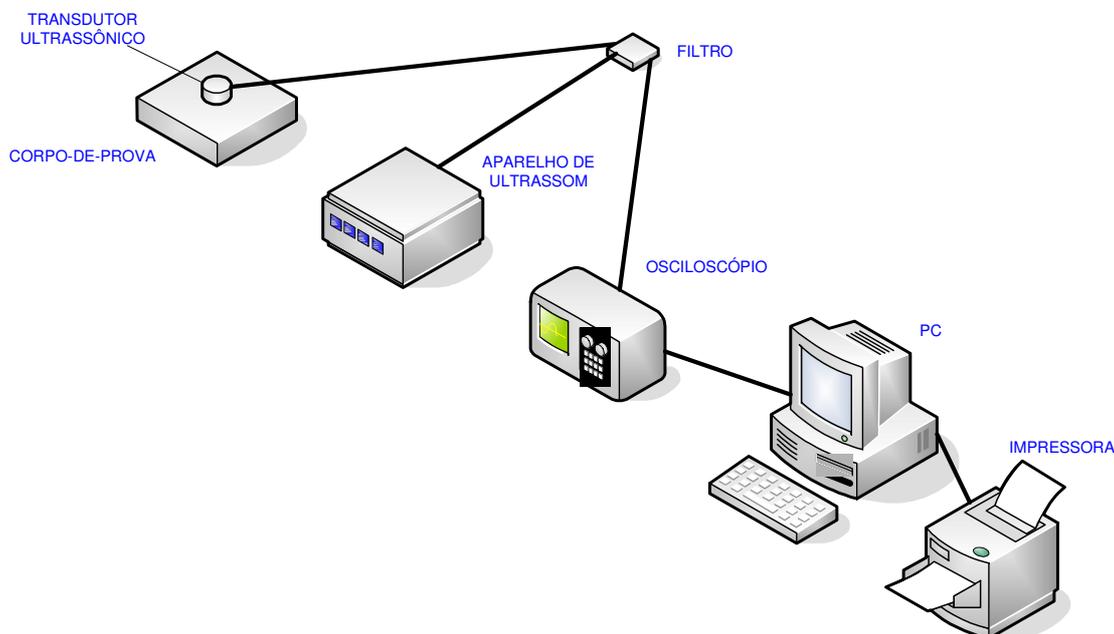


Figura 31 – Desenho esquemático do sistema ultrassônico utilizado no estudo

A Figura 32 mostra o sistema ultrassônico com todos os equipamentos citados em parágrafo anterior, sendo usado na avaliação acustoelástica dos seis tubos na área de fabricação, acompanhado de um termômetro e medidor de umidade da marca Gehaka, modelo Thermo-hygro. Foi utilizado também com o sistema, um equipamento No-break da marca APC, modelo BACK-UPS ES600, apenas por segurança, pois todos os equipamentos estavam acompanhados de suas respectivas baterias de alimentação carregadas.



Figura 32 – Sistema ultrassônico usado no estudo na área reservada da linha de produção

### **3.3.2 – MÉTODO DE CAPTURA DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS A SER USADO NO ESTUDO**

No Laboratório de Ultrassom do Instituto de Engenharia Nuclear (LABUS/IEN) são usadas duas metodologias de captura do sinal ultrassônico gerado por uma onda cisalhante num ensaio ultrassônico: a **“Par-a-par”** e a **“Contínua”**. Estas duas metodologias são descritas a seguir.

#### **3.3.2.1 – METODOLOGIA DE CAPTURA PAR-A-PAR**

O sinal ultrassônico gerado pelo transdutor posicionado com a direção de polarização da onda ultrassônica longitudinal na direção de laminação, denominada no estudo como “direção longitudinal”, é capturado pelo osciloscópio e visualizado em sua tela e em seguida é transferido para o notebook pelo programa WaveStar. Logo a seguir, outro sinal é capturado na “direção transversal”, ou seja, com o transdutor girado a 90° da posição anterior de inspeção, sem sair do ponto em avaliação e perfeitamente acoplado, formando assim um par de sinais. Isso é repetido o número de vezes que for necessário até alcançar o número de pares de sinais determinado para estudo. No armazenamento dos sinais ultrassônicos, o primeiro sinal que forma

cada par é salvo com uma numeração de identificação ímpar e o segundo sinal é salvo com uma numeração par, de maneira seqüencial (1, 2, 3, 4, 5,...). Para cada par de sinais ultrassônicos processados matematicamente pelo programa CHRONOS/ IEN são obtidos os tempos de percurso da onda nas duas direções e o valor da birrefringência acústica correspondente.

### **3.3.2.2 – METODOLOGIA DE CAPTURA CONTÍNUA**

Neste método a captura dos sinais ultrassônicos é iniciada mantendo o transdutor ultrassônico acoplado na peça em inspeção na direção longitudinal, de modo contínuo, ou seja, sem girar o transdutor, até capturar a quantidade de sinais ultrassônicos previamente estabelecida para o estudo. A seguir, o transdutor ultrassônico é girado e posicionado a 90° no mesmo ponto anteriormente inspecionado, e é feita a captura dos sinais ultrassônicos agora na direção transversal, até atingir a mesma quantidade de sinais.

Para a definição da melhor metodologia a ser usada no estudo, foram realizados dois testes, cada um empregando uma das metodologias no corpo-de-prova Inicial de nosso estudo, o CP-0. Este corpo-de-prova (CP) foi extraído de um tubo OCTG do tipo Casing API 5CT Grau N80Q, ou seja, do mesmo material dos tubos usados no estudo, porém produzido e cedido gentilmente em junho de 2011 para os dois testes, pela empresa APOLO TUBULARS S.A.. As dimensões do diâmetro e da espessura do CP-0 são as mesmas dos seis tubos usados no estudo (178 mm de diâmetro externo e 8,05 mm de espessura) e seu comprimento é de apenas 300 mm. Para os testes foi escolhido o ponto 6H, posicionado, marcado e identificado ao centro do comprimento do corpo-de-prova, ou seja, a 180° da linha da solda e a 150 mm das extremidades, conforme a Figura 33.



Figura 33 – Em detalhe o corpo-de-prova CP-0 com o ponto de inspeção 6H marcado e identificado (a 180° da solda), posicionado ao centro do comprimento do CP

### **3.3.2.3 – TESTE USANDO A METODOLOGIA DE CAPTURA PAR-A-PAR**

No primeiro teste foi empregado o método de captura de sinal Par-a-par, sendo capturados cinquenta pares de sinais ultrassônicos da seguinte maneira: captura de um sinal ultrassônico com o transdutor mantido na direção longitudinal e, logo em seguida, a de outro sinal com o transdutor girado a 90°, ou seja, com a direção de polarização da onda transversal a direção de laminação, formando assim um par. Os sinais foram armazenados no notebook, na pasta principal correspondente ao teste com a sequência de 1 a 100. Após o processamento dos cem sinais (cinquenta pares de sinais) usando o programa CHRONOS/IEN, foram obtidos os tempos de percurso da onda ultrassônica polarizada nas duas direções (longitudinal e transversal), para cada par de sinais, e também a birrefringência acustoelástica gerada por cada par de tempos, dando um total de 50 birrefringências. Em seguida a sua média foi calculada, determinando o valor médio de B no ponto 6H do CP-0.

### **3.3.2.4 – TESTE USANDO A METODOLOGIA DE CAPTURA CONTÍNUA**

No segundo teste, usando o método de captura Contínua, foram capturados cinquenta sinais ultrassônicos de forma contínua e sequencial mantendo o transdutor acoplado e posicionado com a onda polarizada na direção longitudinal e, em seguida, os outros cinquenta sinais na direção transversal (transdutor girado a 90°). Os sinais foram armazenados no notebook, nas subpastas correspondentes (longitudinal e transversal) a pasta principal do teste, com a sequência de 1 a 50 em cada uma das direções. Após o processamento dos sinais, com os cinquenta tempos de percurso da onda obtidos em cada direção, foi feita a média resultando no tempo médio de percurso da onda ultrassônica pela espessura do CP-0, em cada direção. A birrefringência calculada por este método é única e obtida usando os dois tempos de percurso médios da onda (longitudinal e transversal) na equação 6, diferentemente do método de captura Par-a-par, onde para cada par se tem uma birrefringência acústica.

Na tela do osciloscópio quando era posicionado o transdutor para iniciar a inspeção num ponto para a captura do sinal ultrassônico, independente da metodologia, eram realizados ajustes nos botões de controle de posicionamento e escala de modo que o sinal visualizado apresentasse dois ecos dispostos no eixo do tempo (abscissa), posicionados cada um no centro de cada metade da tela, e a amplitude destes não ultrapassasse a tela na vertical (escala de tensão no eixo das ordenadas), conforme a Figura 34. Durante todos os ensaios ultrassônicos este controle foi executado, além da observação permanente verificando se alguma irregularidade com o sinal ocorria como ruído e outras interferências para ajustes quando fosse necessário e/ou substituição de cabos, acoplantes e até equipamentos.

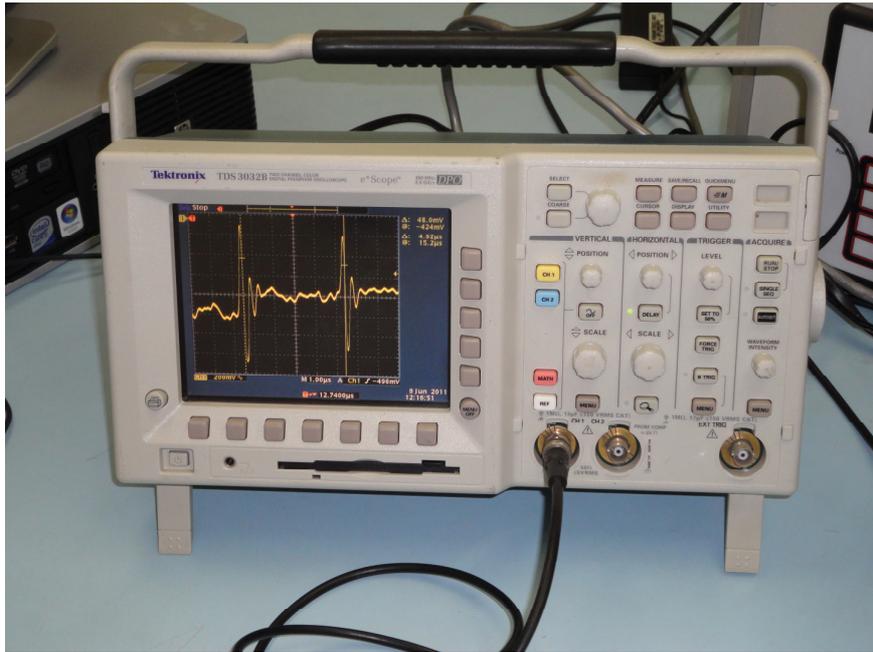


Figura 34 – Osciloscópio com um sinal ultrassônico capturado em sua tela

### **3.3.2.5 – ESCOLHA DA METODOLOGIA DE CAPTURA DO SINAL ULTRASSÔNICO**

De posse dos resultados obtidos nos dois testes foi realizada uma avaliação estatística entre as duas metodologias, levando em conta os desvios padrões obtidos com os tempos de percurso da onda ultrassônica nas duas direções de polarização, longitudinal e transversal. Nesta análise estatística aplicada foi usado o teste de hipóteses. Esta avaliação se encontra no Capítulo 4 item 4.1.3, onde a decisão final tomada para o estudo foi a de adotar a metodologia Contínua para a captura dos sinais ultrassônicos.

A Figura 35 mostra o transdutor ultrassônico acoplado com a direção de polarização da onda na direção longitudinal do CP-0 (direção de laminação do material), e o notebook com o sinal ultrassônico capturado e transferido do osciloscópio pelo programa WaveStar, durante a realização de um teste.

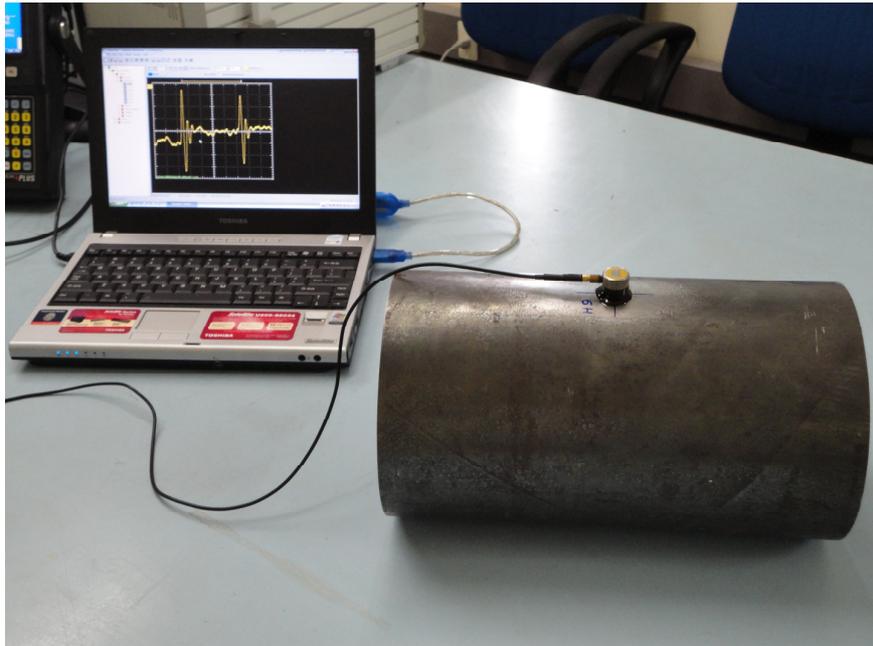


Figura 35 – Transdutor ultrassônico de onda cisalhante e incidência normal acoplado no ponto 6H (180° da solda) ao centro do comprimento do CP-0

### **3.4 – ATIVIDADES PRÁTICAS REALIZADAS NA INDÚSTRIA**

#### **3.4.1 – MARCAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE INSPEÇÃO NOS TUBOS EM ESTUDO**

Para a realização do estudo acustoelástico, seis tubos OCTG do tipo Casing, API 5CT Grau N80Q foram disponibilizados e retirados da linha de produção pela empresa, antes da etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido. Visando facilitar a identificação destes tubos no estudo realizado, foi feita uma tabela de correlação (Tabela 5):

TABELA 5 – Referência usada para os tubos em estudo

<b>IDENTIFICAÇÃO APOLO TUBULARS (TUBO/NÚMERO DE CORRIDA)</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO USADA NO ESTUDO</b>
<b>TUBO AQ620/05AG11</b>	<b>TUBO 1</b>
<b>TUBO AQ612/05AG11</b>	<b>TUBO 2</b>
<b>TUBO AQ611/05AG11</b>	<b>TUBO 3</b>
<b>TUBO AQ608/05AG11</b>	<b>TUBO 4</b>
<b>TUBO AQ609/05AG11</b>	<b>TUBO 5</b>
<b>TUBO AQ610/05AG11</b>	<b>TUBO 6</b>

Antes da marcação e identificação dos pontos de inspeção em cada tubo, todos os pontos selecionados foram verificados quanto ao acabamento da superfície e limpos com panos de algodão e álcool. Felizmente, não houve a necessidade do uso de lixa em nenhum dos pontos na preparação da superfície devido ao excelente nível de acabamento da superfície dos tubos. Deste modo estava garantido um bom acoplamento da superfície dos tubos com o transdutor ultrassônico.

Em cada tubo em estudo foram marcados e identificados, a 600 mm da extremidade selecionada, cinco pontos (12H+, 3H, 6H, 9H e 12H-) a serem inspecionados e avaliados por ultrassom, seguindo o esquema ilustrado no desenho da Figura 36. Observe que os pontos 12H+ e 12H- foram posicionados a 47 mm do centro da solda, ou seja, exatamente a 30° e a 330° do cordão (sentido horário), ficando fora da zona termicamente afetada do cordão (de 4 mm de largura).

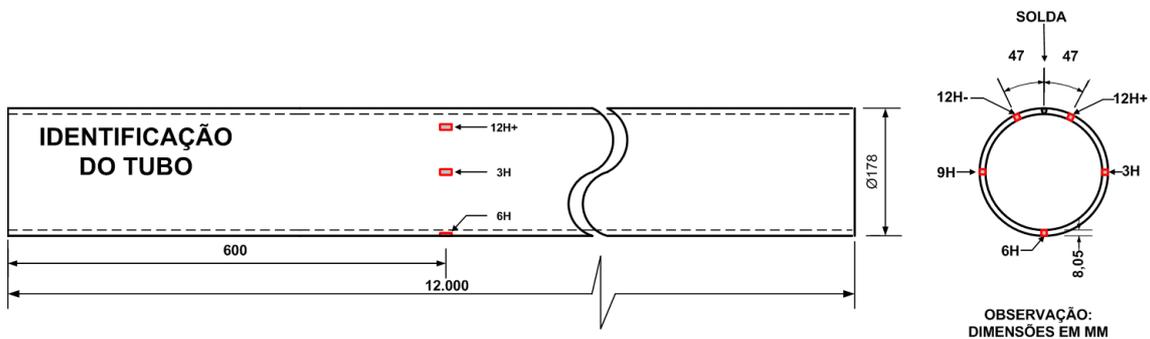


Figura 36 – Desenho esquemático de um tubo inspecionado com a região de estudo contendo seus cinco pontos de avaliação

A operação de marcação dos cinco pontos na região selecionada em um dos seis tubos em estudo, obedecendo ao esquema apresentado anteriormente, pode ser visualizada na Figura 37 a seguir, onde um gabarito é posicionado e utilizado na marcação dos pontos de inspeção feita por uma caneta corretiva branca.



Figura 37 – Marcação dos cinco pontos na região selecionada de um tubo em estudo onde um gabarito é posicionado e utilizado na marcação

### **3.4.2 – PRIMEIRA AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA NA ÁREA DE PRODUÇÃO**

Após a realização das marcações e identificações nos seis tubos, foi iniciada a primeira fase de inspeção ultrassônica obedecendo em cada tubo, a sequência de inspeção nos pontos 12H+, 3H, 6H, 9H e 12H-, contidos na região selecionada para estudo, usando a metodologia de captura de sinal ultrassônico Contínua selecionada para o estudo.

O primeiro tubo a ser ensaiado foi o número 1. Em cada ponto inspecionado, foram capturados em sequência, cinco sinais ultrassônicos com a direção de polarização da onda ultrassônica na direção longitudinal (paralela a de laminação e ao comprimento do tubo), e a seguir, cinco sinais com a direção de polarização da onda na direção transversal.

Este método de captura do sinal ultrassônico utilizado no Tubo 1, definido em teste comparativo realizado em laboratório e explanado no item 3.3.2, e a utilização da coleta sequencial em cada ponto em inspeção, de cinco sinais em cada uma das duas direções, formaram à metodologia empregada em todas as inspeções ultrassônicas realizadas no estudo, seja num tubo, corpo-de-prova chato, tubular ou na forma de chapa.

A ordem de inspeção nesta fase foi sequencial indo do Tubo 1 até o 6. A Figura 38 mostra um dos seis tubos em inspeção no momento em que o técnico

especializado em ultrassom está posicionando o transdutor ultrassônico para ser executada em seguida a captura do sinal pelo osciloscópio.



Figura 38 – Tubo em inspeção na primeira fase do estudo na área de produção

Cada sinal visualizado na tela do osciloscópio era capturado e transportado para o notebook através do programa WaveStar, da Tektronix, sendo armazenado nas suas respectivas pastas, organizadas e mantidas na árvore de diretórios do programa Windows Explorer.

Todos os sinais ultrassônicos capturados dos pontos em inspeção dos tubos e corpos-de-prova durante o estudo foram processados pelo programa CHRONOS/IEN. Este programa funciona em ambiente Labview e processa matematicamente o sinal usando a correlação cruzada e interpolação, conforme metodologia desenvolvida [42]. Visando refinar os sinais e consequentemente os tempos obtidos com alta precisão foi usada no estudo uma interpolação apelidada de L4 (inserção de três novos pontos entre dois pontos reais existentes num sinal ultrassônico). Após a obtenção dos tempos de percurso da onda ultrassônica em cada direção de polarização, (longitudinal e transversal) foram calculadas suas médias. De posse das médias dos tempos percurso nas direções longitudinal ( $t_l$ ) e transversal ( $t_t$ ), foi obtida a birrefringência acústica em cada ponto inspecionado.

### **3.4.3 – RETORNO DOS TUBOS EM INSPEÇÃO A LINHA DE PRODUÇÃO**

Ao término dos ensaios ultrassônicos nos seis tubos na primeira fase de inspeção e, antes de retornarem a linha de fabricação, os tubos receberam uma faixa circunferencial branca, de aproximadamente 250 mm de largura, pintada nas suas extremidades com tinta automotiva na cor branca, como ilustrado na Figura 39 a seguir. Este procedimento foi feito para facilitar o acompanhamento e a retirada dos tubos durante a passagem pelas etapas de fabricação de tratamento térmico de têmpera/revenido e, de desempenho a quente.



Figura 39 – Pintura das extremidades dos tubos OCTG do tipo Casing em estudo sendo realizada por um técnico da APOLO TUBULARS

Após a secagem, os seis tubos retornaram a linha de fabricação exatamente antes da etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido, sendo transportados por uma ponte rolante e posicionados na linha (Figura 40).



Figura 40 – Os seis tubos com a faixa branca nas extremidades retornando a linha de fabricação antes da etapa do tratamento térmico de têmpera/revenido

Na etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido o aquecimento é feito por indução através de oito unidades de aquecimento na têmpera e seis no revenido. Cada tubo atingiu na fase inicial de aquecimento para a realização da têmpera, a temperatura de 739°C, e na última fase 938°C (Figura 41).



Figura 41 – Tubo em ensaio passando pela fase de Têmpera na etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido

Após passar pela última unidade de aquecimento a 938°C, cada tubo recebeu um banho de têmpera por água, a pressão de 35 Bar (Figura 42).

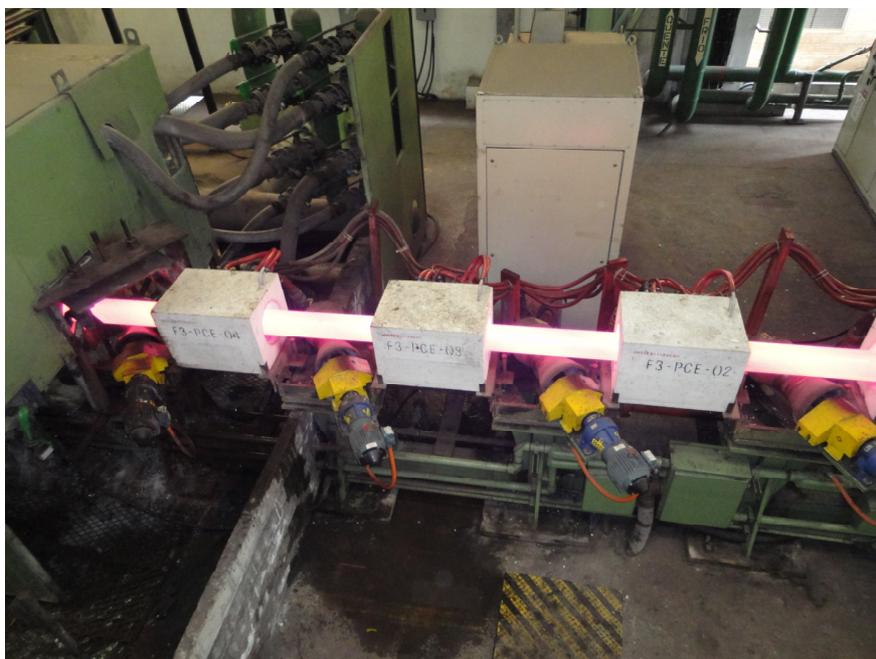


Figura 42 – Tubo 1 entrando no compartimento de resfriamento e recebendo o banho de têmpera

Logo em seguida, cada um dos seis tubos passou pela fase de revenimento entrando a 482°C e saindo a 641°C. Ao final desta etapa, os Tubos 4, 5 e 6 foram retirados da linha de fabricação e colocados em local apropriado para resfriamento ao ar, até alcançarem a temperatura ambiente e serem deslocados para os cavaletes de aço localizados na área reservada, para uma nova avaliação acustoelástica nos cinco pontos pré-avaliados em cada região dos três tubos. A Figura 43 mostra a fase do revenido na etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido dos tubos. Na etapa de fabricação de tratamento térmico de têmpera/revenido o tubo de aço passa de um API 5CT Grau J55 para o Grau N80Q, aumentando a sua resistência mecânica e a sua dureza.



Figura 43 – Fase do Revenido dos tubos OCTG Casing em estudo

Os Tubos 1, 2 e 3 continuaram na linha de fabricação, e passaram ainda pela etapa de desempenho a quente (Figura 44), entrando na desempenadeira com a temperatura de 539°C. Após o desempenho foram retirados da linha de fabricação, sendo separados imediatamente para um local apropriado, permanecendo até o seu resfriamento a temperatura ambiente. Em seguida também foram transportados para os cavaletes na área reservada para uma nova inspeção ultrassônica.

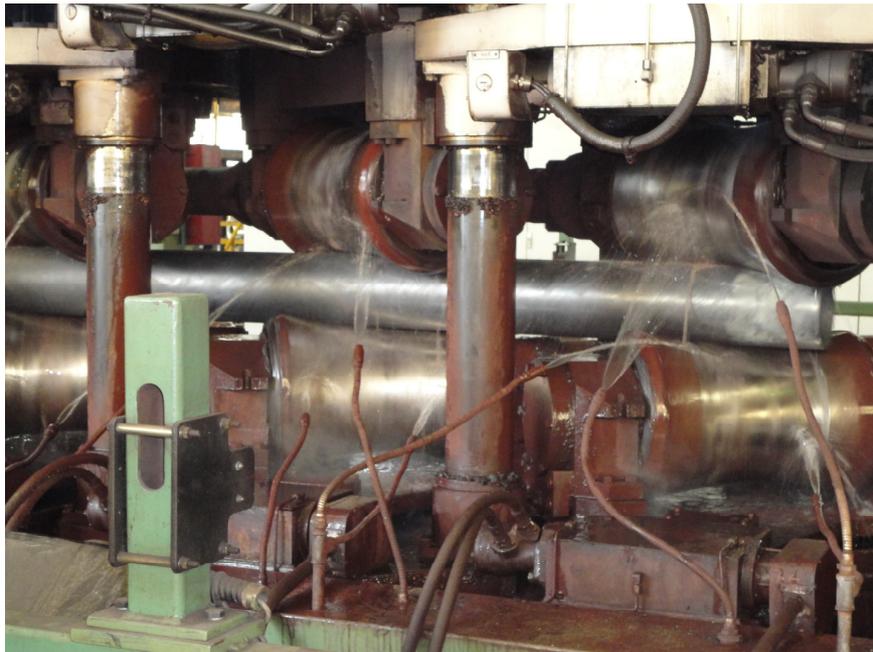


Figura 44 – Tubo 1 iniciando a sua passagem pela etapa de desempenho a quente

Devido ao tempo necessário para resfriamento dos seis tubos até atingirem a temperatura ambiente, a equipe técnica de ensaios de ultrassom, otimizando o tempo na indústria e evitando mais paralisações na linha de fabricação, se deslocou imediatamente para o Laboratório de Qualidade da APOLO TUBULARS para realizar os ensaios de carregamento necessários para a determinação da constante acustoelástica do material.

#### **3.4.4 – LEVANTAMENTO DA CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA DO MATERIAL**

Para o levantamento da constante acustoelástica do material foram confeccionados três corpos-de-prova de tração, com o material previamente retirado do início da bobina de aço T-380 da CSN de número F4462540100, da corrida 1ª2386. Estes corpos-de-prova, identificados como CP-L1, CP-L2 e CP-L3, foram usinados com seu comprimento paralelo a direção de laminação (L) do material da bobina obedecendo à norma ASTM A 370. Eram necessários apenas dois corpos-de-prova, mas por motivo de segurança foram usinados três, pois poderia ocorrer alguma irregularidade durante algum dos ensaios necessários para o levantamento da constante acustoelástica. Cada CP tinha 500 mm de comprimento, e uma seção de ensaio de 38 x 8,10 mm (307,80 mm<sup>2</sup>).

Dois ensaios de carregamento por tração foram realizados na máquina de Ensaios Universal da marca KRATOS, de 100 toneladas, do Laboratório de Qualidade da APOLO TUBULARS S.A..

O primeiro CP identificado como CP-L1, foi tracionado uniaxialmente até o seu rompimento para o levantamento dos limites de escoamento (399 MPa) e de resistência do material da bobina (610 MPa) usado na fabricação dos tubos em estudo.

Com a determinação do valor do limite de escoamento no ensaio realizado com o CP-L1, foram estabelecidas as cargas para interrupção (oito), durante o ensaio de carregamento uniaxial do CP-L2, realizado para o levantamento da constante acustoelástica do material da bobina. A carga máxima para este ensaio foi estabelecida em 12.000 Kgf, ficando abaixo da carga alcançada no limite de escoamento do material em estudo determinado pelo ensaio de carregamento do CP-L1, que foi de 12.546,36 Kgf.

No CP-L2 foi preparada a região da superfície de ensaio, localizada ao centro do comprimento do corpo-de-prova com limpeza feita com álcool e uma estopa (não houve a necessidade de lixamento da superfície), e em seguida foi realizada a

marcação e identificação do ponto a ser inspecionado durante o ensaio de carregamento.

A seguir pode ser visualizado na Figura 45, o CP-L2 fixado na Máquina de Ensaio Universal (MEU), com o transdutor ultrassônico de onda cisalhante e incidência normal posicionado com a direção de polarização da onda na direção longitudinal, e a marcação feita por uma caneta corretiva na cor branca, para orientar o operador do ultrassom com o transdutor durante o ensaio.



Figura 45 – Corpo-de-prova CP-L2 durante o ensaio de carregamento uniaxial para levantamento da Constante Acustoelástica do material usado na fabricação dos tubos em estudo

Na Figura 46 é observada parte da equipe em ação durante um ensaio de carregamento, onde quatro componentes são necessários para a realização deste tipo de ensaio.

O componente que aparece de costas e de pé controla manualmente a carga aplicada pela MEU, de modo que cada carga selecionada para inspeção se mantenha dentro de uma variação estabelecida de  $\pm 30$ Kgf. O outro componente da equipe que se encontra ao lado verifica pelo monitor do microcomputador de controle da MEU o valor da carga que está sendo aplicada no momento, e autoriza ou não a captura do sinal ultrassônico pelo sistema quando solicitada pelo componente responsável (fora da imagem). O terceiro componente que aparece controla o transdutor ultrassônico junto ao CP em ensaio, nesse caso o CP-L2, mantendo o perfeito acoplamento entre

ambos, e operando o posicionamento do transdutor nas duas direções, ou seja, alinhada ao comprimento do CP (direção longitudinal) e transversalmente, quando solicitado pelo componente que controla o sistema ultrassônico, para a captura dos sinais ultrassônicos.



Figura 46 – Máquina de Ensaio Universal e parte da equipe técnica durante o ensaio de carregamento para levantamento da constante acustoelástica do material

Não houve problema de escorregamento do CP durante a realização dos dois ensaios. O corpo-de-prova CP-L3 foi guardado, pois não houve a necessidade de seu uso, graças ao ótimo desempenho obtido nos dois ensaios.

### **3.4.5 – SEGUNDA AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA NA ÁREA DE PRODUÇÃO**

Esta segunda etapa de inspeção foi realizada com os Tubos 4, 5 e 6, que foram retirados da linha de fabricação após passarem pela etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido. Com os tubos à temperatura ambiente, foi realizada a operação de transporte e posicionamento dos mesmos sobre os cavaletes de aço na área reservada para estudo, para a execução de nova avaliação acustoelástica dos tubos.

Antes de ser iniciada a avaliação acustoelástica, foi realizada uma inspeção visual do estado das superfícies e dos pontos de inspeção marcados nos tubos. Foi constatado que as superfícies estavam ótimas, mas devido, provavelmente, às elevadas temperaturas do tratamento térmico, alguns pontos tiveram que ser remarcados nos tubos (Figura 47), pois a visualização das suas marcações realizadas no início do estudo estava difícil.



Figura 47 – Remarcação de alguns pontos de inspeção num tubo que apresentaram dificuldade de visualização após o tratamento térmico de têmpera/revenido

Após a remarcação dos pontos com dificuldade de visualização, os Tubos 4, 5 e 6 foram avaliados ultrassonicamente mais uma vez, e mais cento e cinquenta sinais de tempo de percurso da onda ultrassônica foram armazenados.

### **3.4.6 – TERCEIRA AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA NA ÁREA DE PRODUÇÃO**

Esta fase de inspeção na área de produção foi realizada com os Tubos 1, 2 e 3, retirados da linha de fabricação após a etapa de desempenho a quente. Da mesma maneira que na segunda fase de inspeção foi realizada a operação de transporte dos tubos após alcançarem à temperatura ambiente e posicionamento destes sobre os cavaletes de aço na área reservada para estudo, para execução de nova avaliação acustoelástica.

Nesta fase foi realizada também uma avaliação do estado das superfícies e dos pontos de inspeção marcados nos tubos antes da inspeção ultrassônica. As superfícies estavam ótimas, mas o problema de remarcação de alguns pontos também ocorreu (Figura 48).



Figura 48 – Equipe realizando a remarcação de alguns pontos dos Tubos 1, 2 e 3

Nesta etapa de inspeção ultrassônica dos Tubos 1, 2 e 3 foram armazenados mais cento e cinquenta sinais ultrassônicos capturados.

Ao término das etapas de inspeção ultrassônica na linha de fabricação dos tubos OCTG do tipo Casing, o Tubo 1 foi transportado para o setor de corte da fábrica, e foi extraído o Corpo-de-prova Final (CP-F), contendo ao centro de seu comprimento de 400 mm, os cinco pontos já inspecionados, conforme a Figura 49 a seguir.

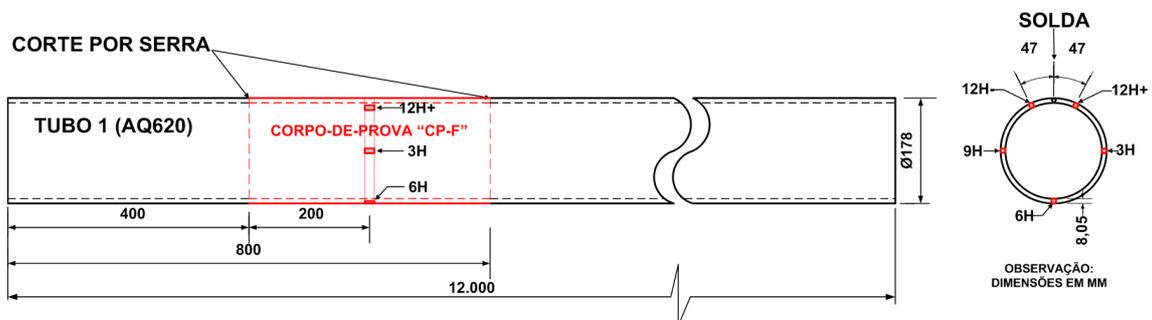


Figura 49 – Localização da região do Corpo-de-prova Final (CP-F) extraído do Tubo 1 destacada em vermelho no desenho

### 3.5 – ATIVIDADES PRÁTICAS REALIZADAS NO LABORATÓRIO DE ULTRASSOM

#### 3.5.1 – LEVANTAMENTO DA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA DO MATERIAL ( $B_{MAT}$ )

Do início da bobina com o número de identificação F4462540100 pertencente à corrida da CSN 1ª2386, usada na fabricação dos tubos em avaliação, foi retirado também material para a usinagem de um corpo-de-prova denominado de CP-4, com as dimensões de 270 x 230 x 8,05 mm, para levantamento da birrefringência acústica do material. Este CP foi transportado para o LABUS/IEN e, obedecendo às localizações e regiões estabelecidas pelo desenho esquemático mostrado na Figura 50, nele foram marcados e numerados trinta pontos de inspeção para a realização da avaliação ultrassônica (Figura 51).

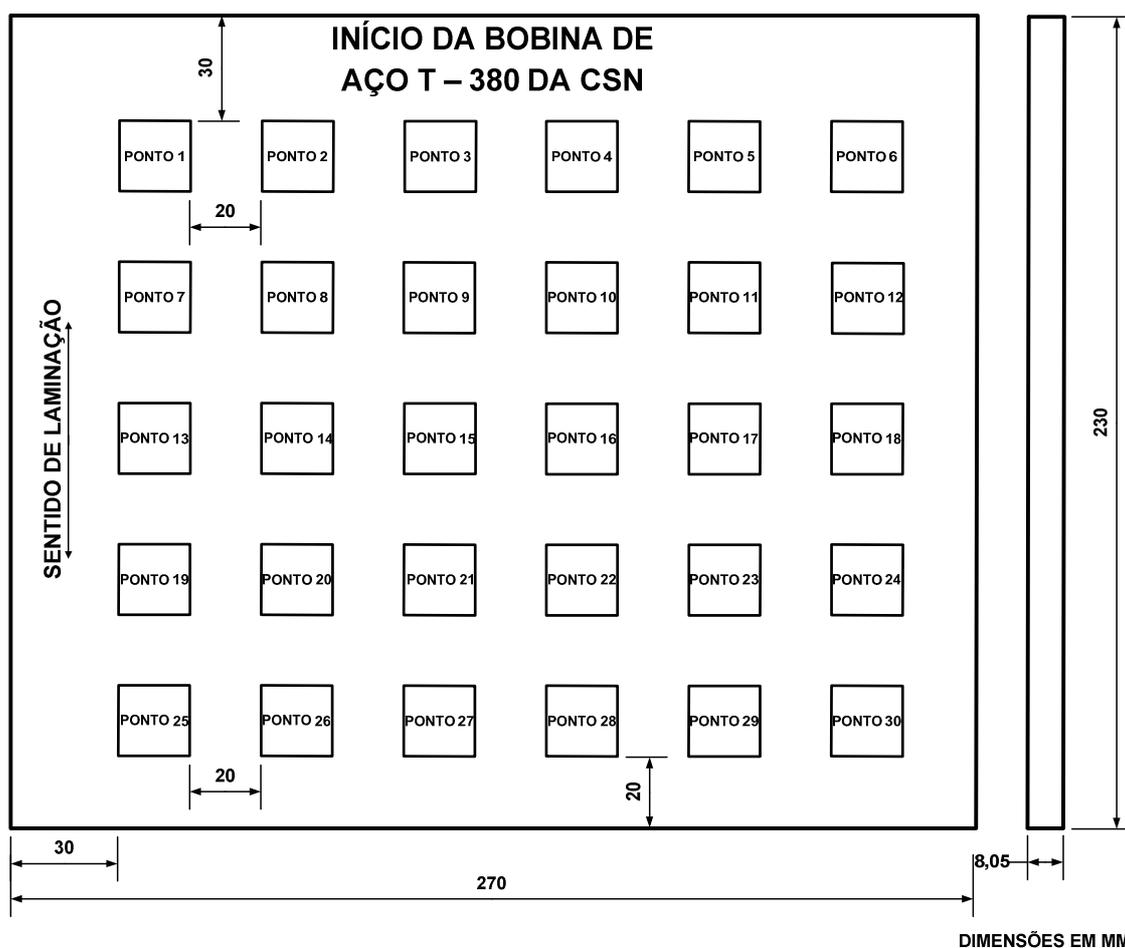


Figura 50 – Desenho esquemático para marcação e identificação dos 30 pontos de inspeção no corpo-de-prova CP-4

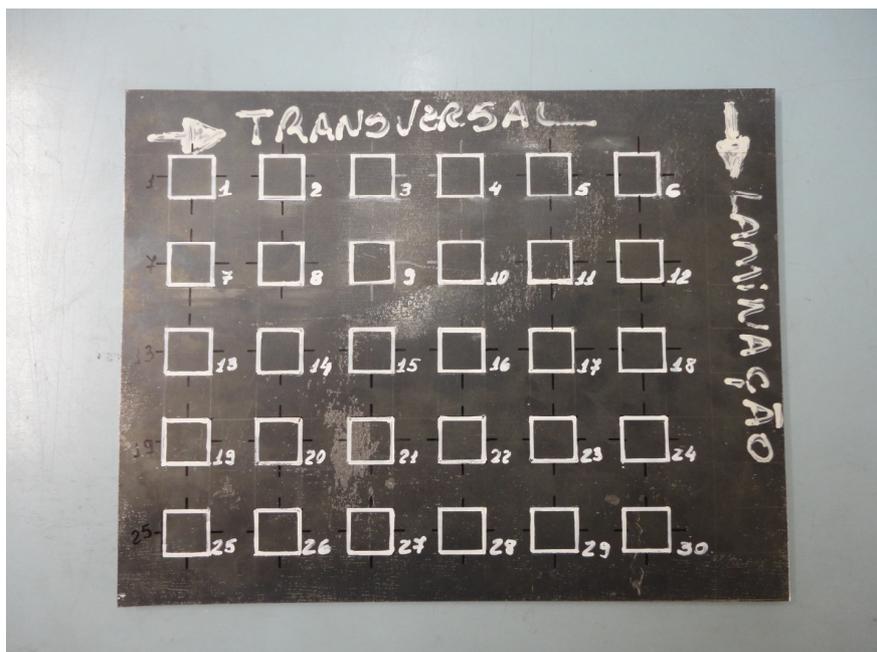


Figura 51 – Corpo-de-prova CP-4 extraído da bobina de aço com seus trinta pontos de inspeção marcados e identificados para efetuar o levantamento do ( $B_{MAT}$ )

O ensaio ultrassônico para o levantamento da birrefringência acústica do material, realizado no LABUS/IEN em cada um dos trinta pontos, seguiu o procedimento de captura adotado. Ao todo foram armazenados trezentos sinais ultrassônicos (150 em cada direção). Estes sinais foram processados e seus respectivos tempos de percurso da onda ultrassônica obtidos.

Focando a determinação da birrefringência acústica do material, em cada um dos pontos foi feita a média aritmética entre os cinco tempos de percurso obtidos em cada direção. De posse da média dos tempos de percurso em cada direção ( $t_i$  e  $t_j$ ), foi calculada a birrefringência de cada ponto. Para a obtenção da birrefringência do material da bobina, foi feita a média entre as birrefringências obtidas nos trinta pontos de inspeção.

### **3.5.2 – TENSÃO RESIDUAL EXISTENTE NO TUBO**

Neste item foi realizada uma comparação entre o resultado da tensão residual obtido pela Técnica Ultrassônica da Birrefringência Acústica e o método da norma ASTM E1928-07 que de forma aproximada estima a tensão residual circumferencial existente no corpo-de-prova [44]. O CP usado nos dois métodos foi extraído de um dos tubos em avaliação, o Tubo 1 (AQ620), selecionado aleatoriamente entre os três

tubos que passaram pelas etapas de tratamento térmico de têmpera/revenido e de desempenho a quente (Tubos 1, 2 e 3).

Este Corpo-de-prova Final, denominado CP-F (Figura 52), foi extraído do Tubo 1 conforme o desenho mostrado na Figura 49, contendo circunferencialmente ao centro de seu comprimento, a região com os cinco pontos já inspecionados nas etapas de fabricação selecionadas para estudo neste tubo, ou seja, antes do tratamento térmico de têmpera/revenido e após o desempenho a quente. O CP-F para os testes foi extraído pelo processo de corte realizado por uma serra mecânica de fita.

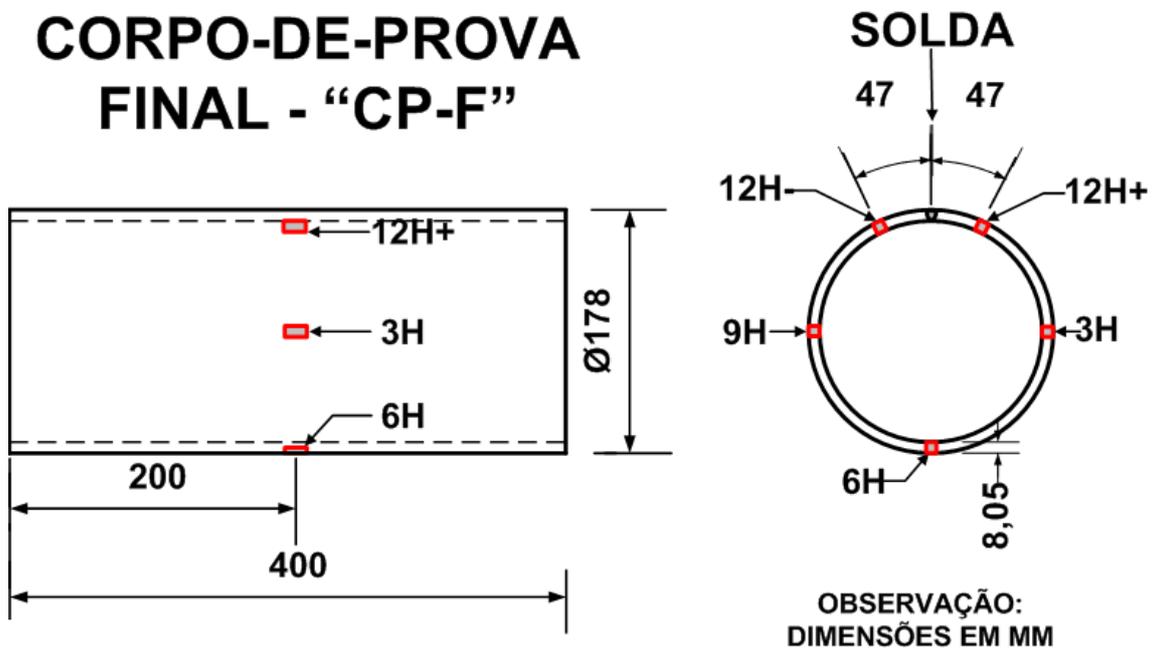


Figura 52 – Desenho do Corpo-de-prova Final (CP-F) extraído do Tubo 1

O método usado pela norma ASTM E1928-07 para determinar a tensão residual circunferencial num tubo, utiliza a equação a seguir:

$$S = \pm \frac{E.e}{1-\mu^2} \times \frac{D_F - D_0}{D_F \cdot D_0} \quad (10) [44]$$

onde:

S → Valores das tensões circunferenciais máxima e mínima que ocorrem na superfície

E → Módulo de elasticidade (assumido como 21.000 Kgf/mm<sup>2</sup>) [45]

e → Espessura média da parede do tubo (mm)

$\mu$  → Coeficiente de Poisson (assumido como 0,3) [45]

$D_0$  → Diâmetro externo médio do tubo antes do corte (mm)

$D_F$  → Diâmetro externo médio do tubo após o corte (mm)

Esta metodologia foi utilizada, porém o CP-F dimensionalmente, não atendia a todos os requisitos da norma, pois seu comprimento do CP era menor que o exigido.

Para a utilização da equação 10, algumas marcações e identificações foram feitas no CP-F, para em seguida serem realizadas algumas avaliações dimensionais necessárias para o uso dessa equação. Em seguida foi feita a operação de usinagem por fresa para corte do CP-F. Após o corte mais avaliações dimensionais foram realizadas para completar as informações necessárias para uso da equação 10, permitindo assim comparar o valor encontrado para a tensão residual circunferencial existente com o determinado pelo método ultrassônico. De maneira seqüencial todas estas operações são descritas a seguir.

No Laboratório de Metrologia do IEN/CNEN (LAMET/IEN) foi feita uma operação de marcação e identificação de linhas, regiões e pontos de interesse no CP-F seguindo orientação dada pela norma ASTM E1928-07:

1. Inicialmente no CP-F foi realizada a marcação de uma linha ao longo do CP-F para execução de operação de corte, sobre o cordão de solda, identificada como 12H.
2. Mais três linhas ao longo do CP-F, exatamente a 90°, 180° e 270° da linha de corte citada no item anterior (posições 3H, 6H e 9H).
3. Quatro seções circunferenciais para estudo (A, B, C e D) dividindo o comprimento do CP-F em cinco partes iguais, exatamente nas quatro linhas traçadas anteriormente nas posições 12H, 3H, 6H e 9H (Figura 53).



Figura 53 – Corpo-de-prova CP-F mostrando o encontro das quatro seções circunferenciais (A, B, C e D) com as linhas longitudinais traçadas nos pontos 3H e 6H em destaque

Para atender a equação 10 dada pela norma, foi realizada a medição do diâmetro externo inicial ( $D_0$ ) do CP-F, exatamente entre os pontos de encontro de cada seção circunferencial (A, B, C e D) com as linhas 3H e 9H. Foram feitas cinco medições do diâmetro externo do CP-F entre esses pontos de encontro e em seguida a média dessas cinco medidas realizadas. Após a obtenção das quatro médias, foi feita a média final entre elas e determinado o diâmetro externo inicial  $D_0$ .

Nas medições do CP-F foram utilizados instrumentos de medição como, paquímetros, calibrador traçador de altura, micrômetro e relógio comparador. Em seguida o CP-F foi levado do LAMET/IEN para a Oficina Mecânica do IEN/CNEN.

Na oficina o corte do CP-F foi realizado longitudinalmente ao cordão de solda através de uma operação de usinagem por fresa (fresamento). A fresadora vertical utilizada era da marca ROMI, modelo U-30, e a fresa de topo tinha o diâmetro de 6 mm. Durante a operação de corte foram utilizados passos mínimos (de 0,20 a 0,50 mm) e um avanço pequeno (11,2 mm/min) de modo que o CP-F não sofresse variação de seu estado de tensões. Foram realizados aproximadamente 26 passes com a fresa ao longo do CP até o corte total ser obtido. Dois fixadores especiais para fixação do CP-F na bancada da fresadora foram confeccionados visando o mínimo de interferência possível no estado de tensões existente no CP durante a operação de corte. O final da operação de usinagem pode ser visualizada na Figura 54, onde o tubo

já aparece cortado e com uma abertura de 10 mm, maior 4 mm que a largura do corte de 6 mm feito pela fresa.

Após o corte o CP-F passou a ser chamado de CP-F-RA (Corpo-de-prova Final com Rasgo). O CP foi levado para o LAMET/IEN onde foi feita a medição do diâmetro externo final ( $D_F$ ), da mesma forma que a realizada para a medição do  $D_0$  (segundo orientação da norma).



Figura 54 – No detalhe o CP-F com o rasgo (CP-F-RA) e os fixadores especiais confeccionados para este estudo (um em cada extremidade)

Continuando o processo de medição, foram realizadas medições da espessura efetiva ( $e$ ) da parede do tubo, nos pontos de encontro das quatro seções circunferenciais (A, B, C e D) com a linha longitudinal 6H, sendo feitas cinco medições em cada ponto de encontro. Em seguida foram feitas as médias das medidas em cada um dos pontos avaliados e entre os quatro pontos, determinando o valor de “ $e$ ”.

De posse de todos os dados necessários para calcular usando a equação 10, dada pela norma [44], foi realizado o cálculo e obtido o valor estimado da tensão residual circunferencial existente no Tubo 1;

Em seguida o CP-F-RA foi levado para o LABUS/IEN e uma nova inspeção ultrassônica nos cinco pontos foi realizada. Com os sinais ultrassônicos foram obtidos os tempos de percurso da onda ultrassônica de cada ponto, nas duas direções de polarização. A média foi feita e com os valores dos dois tempos de percurso médios

da onda ( $t_i$  e  $t_r$ ) foi obtido o valor da birrefringência acústica existente em cada ponto de inspeção. Usando na equação 9 como  $B_0$  o valor de  $B_{MAT}$ , foi calculada a tensão residual existente em cada ponto inspecionado do CP-F-RA e a média das tensões encontradas nestes cinco pontos de inspeção sendo determinado valor da tensão média existente no CP. Para o cálculo da tensão existente no Tubo 1 foi usado também como  $B_0$  o valor de  $B_{MAT}$ , e foi usada a mesma sequência de cálculos usada para o CP-F-RA. Ao final, foi determinado o valor da tensão residual existente no Tubo 1 subtraindo o valor da tensão no CP-F-RA do valor da tensão média existente no Tubo 1 - DD.

Outra maneira empregada para o cálculo da tensão residual existente no Tubo 1 – DD foi usar o valor da birrefringência acústica determinada em cada ponto do CP-F-RA como  $B_0$  e com o valor de  $B$  correspondente em cada um dos cinco pontos de inspeção do Tubo 1 – DD e o da constante acustoelástica  $A$ , foi calculado o valor da tensão em cada ponto. Em seguida foi tirada a média entre os cinco valores calculados, e o valor encontrado foi o mesmo obtido pela metodologia de cálculo anterior.

Com os resultados da tensão residual existente no Tubo 1 obtidos pelos métodos ultrassônico e da norma ASTM E1928-07, foi realizada uma comparação e constatada uma diferença de 3% entre os resultados em relação ao limite de escoamento do material do tubo pronto (80 Ksi).

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 – TESTES PARA SELEÇÃO DA METODOLOGIA DE CAPTURA DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS A SER USADA NO ESTUDO**

Para a seleção da metodologia de captura de sinal ultrassônico a ser usada no estudo, foram realizados dois testes ultrassônicos no ponto 6H do Corpo-de-prova Inicial (CP-0) empregando em cada um deles, uma das metodologias de captura, conforme descrição feita no item 3.3.2. Este corpo-de-prova, extraído de um tubo de aço OCTG do tipo Casing, API 5CT Grau N80Q, tinha as seguintes dimensões: 178 mm de diâmetro, 8,05 mm de espessura e 300 mm de comprimento. O sistema ultrassônico utilizado nos testes foi o apresentado no item 3.3.1 (Figura 55).

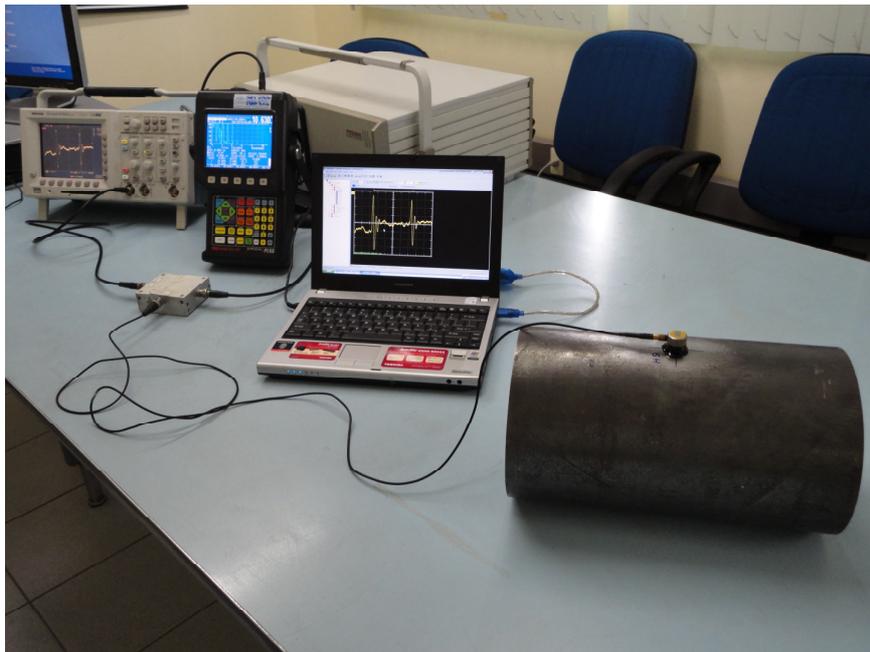


Figura 55 – Corpo-de-prova Inicial CP-0 e o sistema ultrassônico durante um dos testes para seleção da metodologia de captura do sinal ultrassônico

A primeira metodologia avaliada foi a “Par-a-par”, onde é capturado um sinal ultrassônico pelo sistema com a direção de polarização da onda ultrassônica, longitudinal a direção de laminação e, logo a seguir, é feita a captura de um novo sinal no mesmo ponto de inspeção, porém na direção transversal a de laminação. A segunda metodologia avaliada foi a “Contínua”, a qual captura uma quantidade pré-determinada de sinais ultrassônicos na direção de polarização longitudinal a direção

de laminação e depois a mesma quantidade de sinais na direção transversal, conforme item 3.3.2.

#### 4.1.1 – METODOLOGIA PAR-A-PAR

Seguindo o descrito no item 3.3.2.3, foram obtidos os tempos do primeiro teste de seleção empregando a metodologia de captura de sinal ultrassônico “Par-a-par”, registrados na Tabela 6 adiante.

Com os tempos da tabela foram levantados dois gráficos (Figuras 56 e 57) mostrando a variação dos tempos de percurso da onda em cada direção de polarização (longitudinal e transversal), durante a captura dos cinquenta pares de sinais ultrassônicos.

No primeiro gráfico (Figura 56), foi observado que a onda ultrassônica com a direção de polarização longitudinal, apresentou o tempo de  $4,914E-06$  com uma frequência de 62% dos tempos capturados nesta direção.

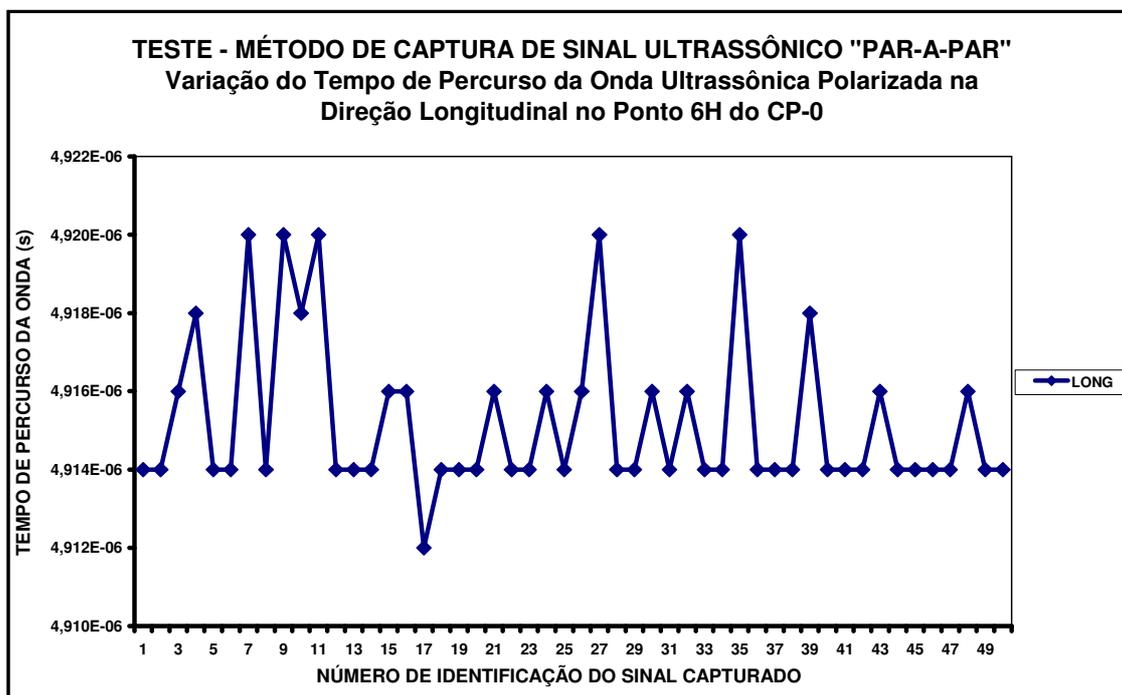


Figura 56 – Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica na direção de polarização longitudinal no ponto 6H (62% de frequência do tempo de  $4,914E-06$ )

Tabela 6 – Tempos obtidos no teste com a metodologia de captura de sinal “Par-a-par” aplicada ao corpo-de-prova CP-0

<b>TESTE USANDO A METODOLOGIA DE CAPTURA "PAR-A-PAR"</b>			
<b>(50 SINAIS CAPTURADOS EM CADA DIREÇÃO – PONTO 6H DO CP-0)</b>			
<b>PAR</b>	<b>TEMPO DE PERCURSO DA ONDA (s)</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
	<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	
1	4,914E-06	4,918E-06	-8,137E-04
2	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
3	4,916E-06	4,920E-06	-8,133E-04
4	4,918E-06	4,916E-06	4,068E-04
5	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
6	4,914E-06	4,922E-06	-1,627E-03
7	4,920E-06	4,920E-06	0,000E+00
8	4,914E-06	4,918E-06	-8,137E-04
9	4,920E-06	4,918E-06	4,066E-04
10	4,918E-06	4,922E-06	-8,130E-04
11	4,920E-06	4,918E-06	4,066E-04
12	4,914E-06	4,914E-06	0,000E+00
13	4,914E-06	4,916E-06	-4,069E-04
14	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
15	4,916E-06	4,922E-06	-1,220E-03
16	4,916E-06	4,922E-06	-1,220E-03
17	4,912E-06	4,914E-06	-4,071E-04
18	4,914E-06	4,916E-06	-4,069E-04
19	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
20	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
21	4,916E-06	4,918E-06	-4,068E-04
22	4,914E-06	4,916E-06	-4,069E-04
23	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
24	4,916E-06	4,917E-06	-2,034E-04
25	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
26	4,916E-06	4,922E-06	-1,220E-03
27	4,920E-06	4,920E-06	0,000E+00
28	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
29	4,914E-06	4,922E-06	-1,627E-03
30	4,916E-06	4,920E-06	-8,133E-04
31	4,914E-06	4,918E-06	-8,137E-04
32	4,916E-06	4,920E-06	-8,133E-04
33	4,914E-06	4,922E-06	-1,627E-03
34	4,914E-06	4,924E-06	-2,033E-03
35	4,920E-06	4,924E-06	-8,127E-04
36	4,914E-06	4,918E-06	-8,137E-04
37	4,914E-06	4,922E-06	-1,627E-03
38	4,914E-06	4,918E-06	-8,137E-04
39	4,918E-06	4,920E-06	-4,066E-04
40	4,914E-06	4,924E-06	-2,033E-03
41	4,914E-06	4,922E-06	-1,627E-03
42	4,914E-06	4,926E-06	-2,439E-03
43	4,916E-06	4,920E-06	-8,133E-04
44	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
45	4,914E-06	4,920E-06	-1,220E-03
46	4,914E-06	4,916E-06	-4,069E-04
47	4,914E-06	4,914E-06	0,000E+00
48	4,916E-06	4,920E-06	-8,133E-04
49	4,914E-06	4,918E-06	-8,137E-04
50	4,914E-06	4,914E-06	0,000E+00
<b>MÉDIA</b>	<b>4,915E-06</b>	<b>4,919E-06</b>	<b>-8,581E-04</b>

Já na direção transversal foi observada a frequência do tempo de  $4,920E-06$  em 36% dos dados obtidos (Figura 57).

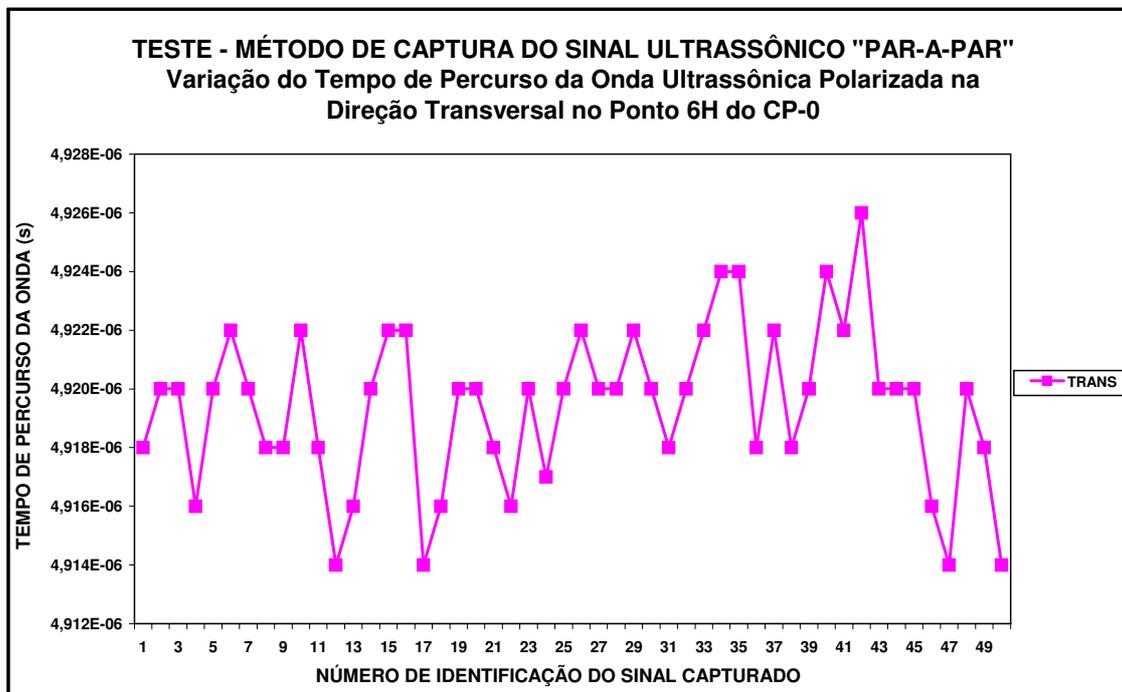


Figura 57 – Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica com a direção de polarização transversal no ponto 6H (36% de frequência do tempo de  $4,920E-06$ )

Os tempos obtidos neste teste foram avaliados estatisticamente com os do item a seguir para a tomada de decisão da metodologia a ser usada no estudo.

#### **4.1.2 – METODOLOGIA CONTÍNUA**

Realizando o descrito no item 3.3.2.4 para a metodologia de captura de sinal ultrassônico “Contínua”, foram obtidos os dados do segundo teste de seleção (tempos de percurso da onda), que se apresentam armazenados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Tempos obtidos no teste com a metodologia de captura de sinal “Contínua” aplicada ao corpo-de-prova CP-0

<b>TESTE USANDO A METODOLOGIA DE CAPTURA "CONTÍNUA"</b>		
<b>(50 SINAIS CAPTURADOS EM CADA DIREÇÃO – PONTO 6H DO CP-0)</b>		
<b>SINAL</b>	<b>TEMPO DE PERCURSO DA ONDA (s)</b>	
	<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>
1	4,914E-06	4,926E-06
2	4,920E-06	4,926E-06
3	4,920E-06	4,926E-06
4	4,922E-06	4,926E-06
5	4,920E-06	4,929E-06
6	4,920E-06	4,926E-06
7	4,926E-06	4,926E-06
8	4,926E-06	4,926E-06
9	4,926E-06	4,926E-06
10	4,926E-06	4,926E-06
11	4,926E-06	4,926E-06
12	4,926E-06	4,929E-06
13	4,926E-06	4,926E-06
14	4,926E-06	4,926E-06
15	4,926E-06	4,926E-06
16	4,926E-06	4,926E-06
17	4,926E-06	4,926E-06
18	4,926E-06	4,926E-06
19	4,926E-06	4,926E-06
20	4,926E-06	4,926E-06
21	4,926E-06	4,926E-06
22	4,926E-06	4,930E-06
23	4,926E-06	4,926E-06
24	4,926E-06	4,926E-06
25	4,926E-06	4,926E-06
26	4,922E-06	4,929E-06
27	4,926E-06	4,926E-06
28	4,926E-06	4,929E-06
29	4,926E-06	4,926E-06
30	4,926E-06	4,926E-06
31	4,926E-06	4,926E-06
32	4,926E-06	4,930E-06
33	4,926E-06	4,928E-06
34	4,926E-06	4,926E-06
35	4,920E-06	4,929E-06
36	4,922E-06	4,930E-06
37	4,926E-06	4,928E-06
38	4,926E-06	4,920E-06
39	4,923E-06	4,924E-06
40	4,923E-06	4,926E-06
41	4,926E-06	4,926E-06
42	4,920E-06	4,928E-06
43	4,924E-06	4,928E-06
44	4,926E-06	4,926E-06
45	4,922E-06	4,930E-06
46	4,920E-06	4,928E-06
47	4,926E-06	4,926E-06
48	4,926E-06	4,922E-06
49	4,914E-06	4,924E-06
50	4,926E-06	4,926E-06
<b>MÉDIA</b>	<b>4,924E-06</b>	<b>4,927E-06</b>

Nesta metodologia também foram levantados dois gráficos com os tempos (Figuras 58 e 59), da mesma maneira que os apresentados na metodologia “Par-a-par”, ilustrando a variação dos tempos de percurso da onda em cada direção de polarização (longitudinal e transversal), durante a captura dos cinquenta pares de sinais ultrassônicos.

No primeiro gráfico (Figura 58), foi observado que a onda ultrassônica com a direção de polarização longitudinal, apresentou o tempo de percurso de  $4,926E-06$  com uma frequência de 66% dos tempos capturados nesta direção.

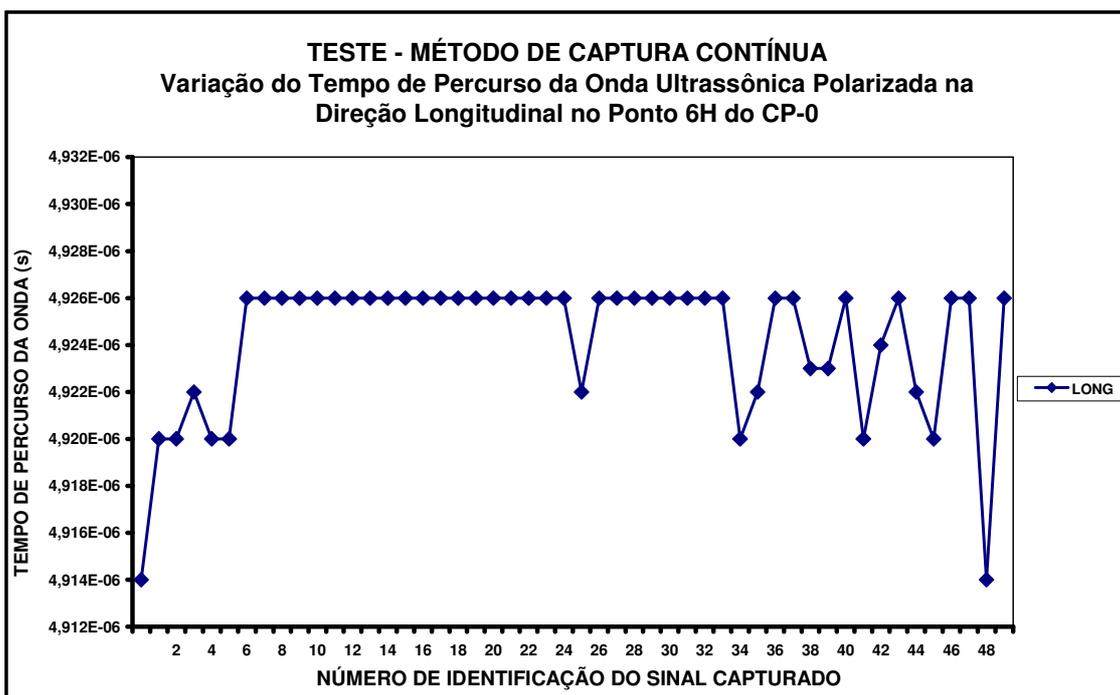


Figura 58 – Tempo de percurso da onda ultrassônica na direção longitudinal (68% de frequência do tempo de  $4,926E-06$ )

Na direção transversal foi observada a frequência do tempo de percurso de  $4,926E-06$  em 62% dos dados obtidos (Figura 59).

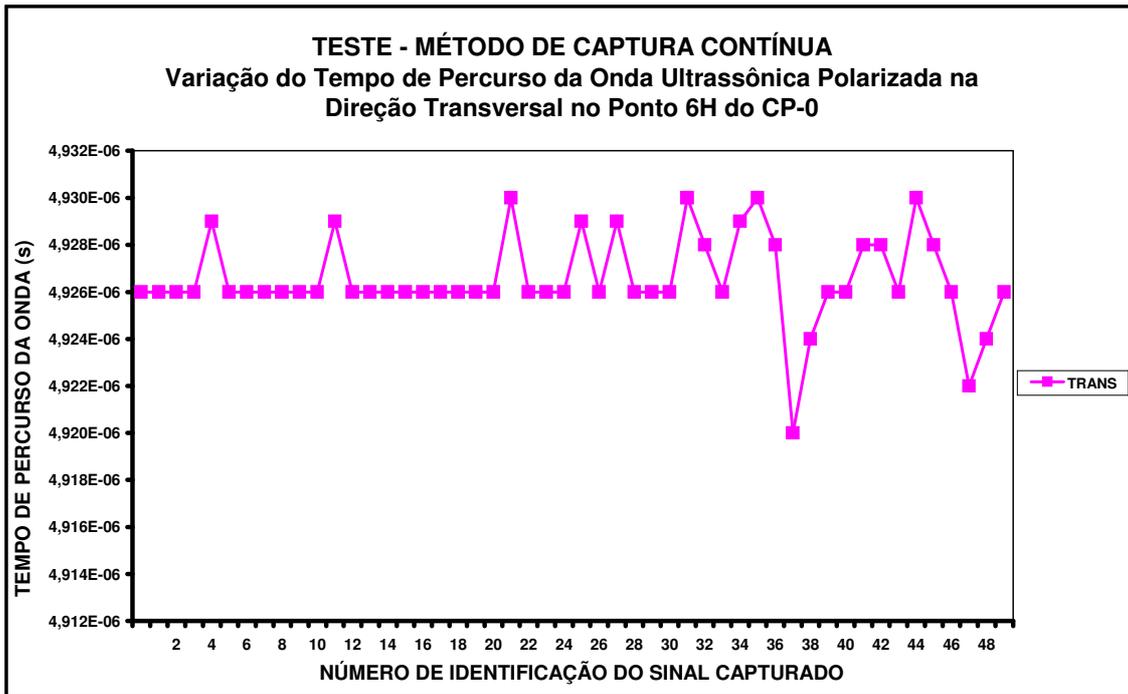


Figura 59 – Tempo de percurso da onda ultrassônica na direção transversal (64% de frequência do tempo de 4,926E-06)

Os tempos deste teste foram comparados estatisticamente com os do item anterior para a tomada de decisão da metodologia a ser usada no estudo.

#### **4.1.3 – SELEÇÃO DA METODOLOGIA DE CAPTURA DOS SINAIS ULTRASSÔNICOS**

Com os valores dos tempos de percurso da onda ultrassônica obtidos nas duas metodologias (Tabelas 6 e 7), foi realizada uma avaliação estatística comparando suas variâncias.

Para esta comparação foi feito o seguinte teste de hipóteses:

$\sigma_1 = \sigma_2 \rightarrow$  Hipótese nula

$\sigma_1 \neq \sigma_2 \rightarrow$  Hipótese alternativa

com:

$\alpha = 0,05$  (nível de significância selecionado e definido para o teste de hipótese)

$n = 50$  (número de tempos de percurso da onda ultrassônica capturados em cada direção)

$p \rightarrow$  valor de  $p$  (valor de referência calculado pelo programa estatístico, a ser comparado com o valor do nível de significância  $\alpha$  definido)

sendo,

$\sigma_1$  e  $\sigma_2$  os desvios padrões encontrados para os tempos numa direção de percurso da onda para cada metodologia.

O programa de computação estatístico usado para esta análise foi o MINITAB16. Em cada um dos testes de hipótese foram inseridos os tempos de percurso da onda ultrassônica em uma das direções de polarização, ou seja, um teste com os tempos dos dois métodos na direção de polarização longitudinal e o outro na transversal (Tabelas 6 e 7).

Para a hipótese nula ser aceita o valor de “ $p$ ” deve ser maior que o de “ $\alpha$ ”, pois isso mostra que os desvios padrões podem ser considerados estatisticamente iguais. Em caso contrário a hipótese nula é rejeitada.

Analisando os tempos de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção longitudinal obtidos nos dois métodos, a hipótese nula foi aceita, pois  $\alpha = 0,05 < p = 0,317$  indicando que os desvios padrões de  $2,020E-09$  na metodologia Par-a-par e  $3,077E-09$  na Contínua nesta direção de polarização, não são significativamente diferentes, podendo ser considerados estatisticamente iguais.

Para o caso dos tempos na direção transversal a hipótese nula foi rejeitada, pois  $\alpha = 0,05 > p = 0,012$ , indicando que os desvios padrões de  $2,756E-09$  na metodologia Par-a-par e de  $1,887E-09$  na metodologia Contínua são significativamente diferentes.

Por apresentar um desvio padrão menor neste último caso, a metodologia de captura de sinal ultrassônico escolhida para ser usada no estudo foi a “Contínua”.

A indicação desta escolha foi reforçada pela frequência dos valores modais (frequência de um valor) que em ambos os casos se mostrou superior na metodologia de captura de sinal ultrassônico “Contínua”. Como pode ser constatado nas Figuras 56 e 57 para a metodologia “Par-a-par” e, nas Figuras 58 e 59 para a “Contínua”, foi observada a frequência de um determinado valor de tempo de percurso (valor modal) nas duas direções dos dois testes. Na metodologia “Par-a-par” ocorreu a frequência de um valor de tempo de percurso de 62% na direção longitudinal e 36% na transversal, enquanto na metodologia “Contínua” foi observada a frequência de um valor modal de tempo de percurso da onda de 66% na direção de polarização longitudinal e 64% na direção transversal.

A metodologia “Contínua” mostrou ainda grande simplicidade, praticidade e rapidez na captura dos sinais ultrassônicos, quando comparada a “Par-a-par”.

Logo, ficou clara a importância de uma avaliação estatística prévia com os tempos de percurso da onda ultrassônica nas duas direções de polarização para selecionar a metodologia de captura do sinal ultrassônico mais adequada antes de ser iniciado um estudo, pois cada material pode responder ultrassonicamente de uma maneira dependendo de seu estado anisotrópico e, de sua distribuição, se homogênea ou não.

#### **4.2 – LEVANTAMENTO DA CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA DO MATERIAL (A)**

Para o levantamento da constante acustoelástica do material dos tubos foram realizados dois ensaios de carregamento por tração uniaxial no Laboratório de Qualidade da APOLO TUBULARS S.A.. O corpo-de-prova CP-L1 foi ensaiado até ser alcançado o seu limite de resistência. Os resultados do teste deram o valor de 40,69Kgf/mm<sup>2</sup> (399 MPa) para o limite de escoamento do material dos tubos e de 62,20Kgf/mm<sup>2</sup> (610 MPa) para o limite de resistência. De posse do valor do limite de escoamento, foram determinadas as cargas para interrupção e captura dos sinais ultrassônicos no ponto central do corpo-de-prova CP-L2. A seção deste corpo-de-prova era de 307,80 mm<sup>2</sup>. A seguir a Tabela 8 apresenta os valores das oito cargas selecionadas para interrupção durante o ensaio de carregamento e os correspondentes valores de tensão a que o CP-L2 estava sujeito.

Tabela 8 – Relação Carga x Tensão aplicada no CP-L2 durante o ensaio de tração uniaxial com parada nas cargas pré-selecionadas

<b>CARGA (Kgf)</b>	<b>TENSÃO (Kgf/mm<sup>2</sup>)</b>
<b>0</b>	<b>0,00</b>
<b>2.000</b>	<b>6,49</b>
<b>4.000</b>	<b>12,98</b>
<b>6.000</b>	<b>19,47</b>
<b>8.000</b>	<b>25,96</b>
<b>9.000</b>	<b>29,21</b>
<b>10.000</b>	<b>32,45</b>
<b>11.000</b>	<b>35,70</b>
<b>12.000</b>	<b>38,95</b>

Conforme o item 3.4.4 em cada carga definida para interrupção do ensaio os sinais ultrassônicos foram capturados pela metodologia “Contínua”, definida para o estudo no item 4.2, e processados pelo programa CHRONOS/IEN. Com os tempos de percurso obtidos foi calculada a birrefringência acústica em cada carga, permitindo a montagem do gráfico da Figura 60, que mostra a variação de B ao longo do ensaio de carregamento uniaxial executado para levantamento da constante acustoelástica.

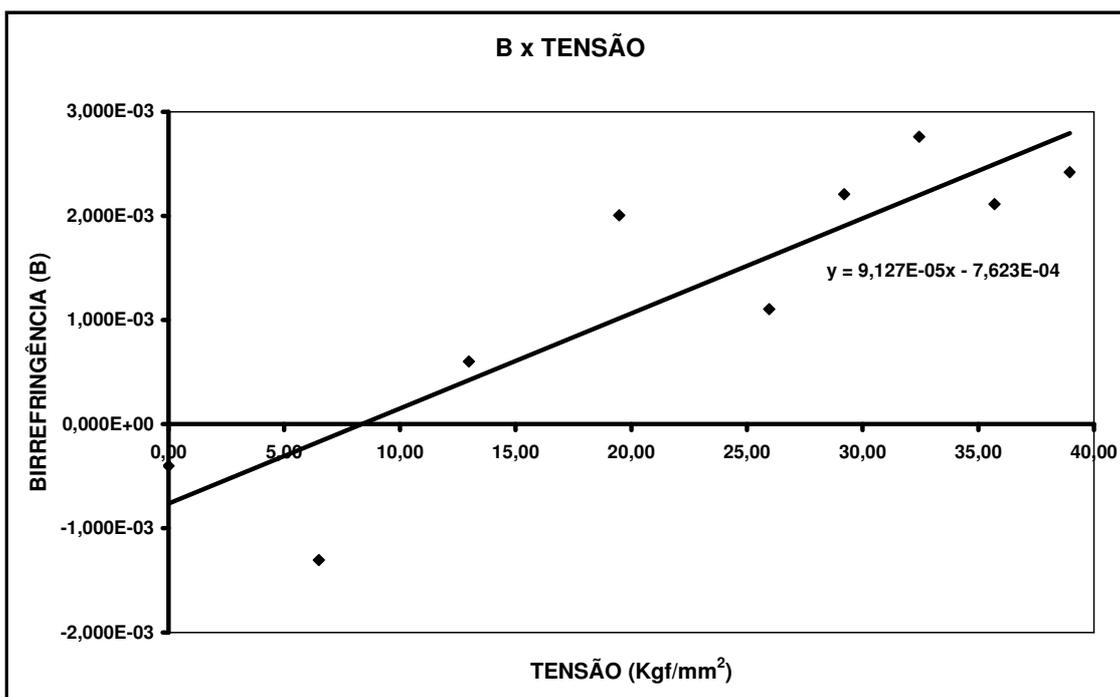


Figura 60 – Variação de B em função da tensão aplicada ao CP-L2 durante o ensaio de carregamento uniaxial para levantamento da constante acustoelástica do material

A partir deste gráfico é possível a obtenção da constante acustoelástica do material de maneira prática, pois esta é o coeficiente angular da reta obtida pelo comportamento linear da birrefringência acústica em função da tensão aplicada. Para o material em estudo o valor da constante acustoelástica obtido foi de  $9,127E-05$   $(\text{Kgf/mm}^2)^{-1}$ .

### 4.3 – DETERMINAÇÃO DA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA DO MATERIAL ( $B_{MAT}$ )

Foi realizada uma avaliação acustoelástica num corpo-de-prova plano extraído da bobina com o aço usado na fabricação dos tubos em estudo (CP-4), em trinta pontos marcados, conforme descrição feita no item 3.5.1, para determinar o valor da birrefringência acústica do material da bobina (Aço T-380 da CSN) e ainda o grau de anisotropia e a sua distribuição, se homogênea ou não. O teste foi realizado nas instalações do LABUS/IEN, obedecendo a sequência dos pontos marcados no CP-4 (Figura 61).

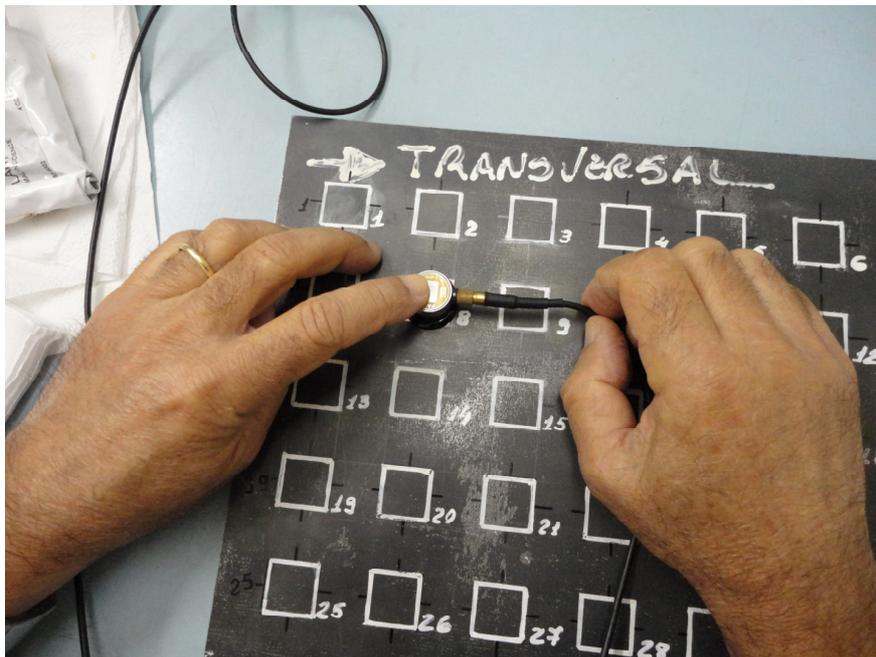


Figura 61 – Corpo-de-prova CP-4 retirado da bobina de aço no momento em que o ponto 8 está sendo inspecionado pelo técnico em ultrassom

Ao todo foram armazenados trezentos sinais nas duas direções de polarização da onda. Estes sinais foram processados pelo programa CHRONOS/IEN e obtidos os respectivos tempos de percurso da onda ultrassônica. Esses tempos de percurso da onda em cada ponto de inspeção e os valores das suas respectivas birrefringências podem ser apreciados na Tabela 9 a seguir. O valor de cada tempo registrado na tabela é o resultado final da média dos cinco tempos de percurso da onda obtidos em cada uma das direções de cada ponto, e o valor das respectivas birrefringências, é determinado usando na equação 6 os tempos obtidos.

**Tabela 9** – Dados obtidos no teste com o corpo-de-prova CP-4

<b>ENSAIO ULTRASSÔNICO: CP-4</b>			
<b>(TEMPOS MÉDIOS DE 5 SINAIS CAPTURADOS EM CADA DIREÇÃO)</b>			
<b>PONTO</b>	<b>TEMPO DE PERCURSO DA ONDA (s)</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
	<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	
1	4,982E-06	4,986E-06	-8,427E-04
2	4,986E-06	4,990E-06	-7,218E-04
3	4,988E-06	4,992E-06	-7,715E-04
4	4,987E-06	4,992E-06	-1,022E-03
5	4,991E-06	4,992E-06	-1,202E-04
6	4,988E-06	4,992E-06	-8,417E-04
7	4,988E-06	4,992E-06	-7,415E-04
8	4,991E-06	4,992E-06	-2,104E-04
9	4,992E-06	4,992E-06	-3,005E-05
10	4,988E-06	4,992E-06	-7,816E-04
11	4,987E-06	4,992E-06	-1,002E-03
12	4,992E-06	4,992E-06	-2,003E-05
13	4,984E-06	4,986E-06	-3,410E-04
14	4,988E-06	4,992E-06	-8,317E-04
15	4,992E-06	4,998E-06	-1,201E-03
16	4,979E-06	4,980E-06	-2,008E-04
17	4,992E-06	4,996E-06	-8,710E-04
18	4,986E-06	4,992E-06	-1,193E-03
19	4,980E-06	4,985E-06	-1,034E-03
20	4,986E-06	4,992E-06	-1,283E-03
21	4,986E-06	4,994E-06	-1,563E-03
22	4,986E-06	4,991E-06	-1,052E-03
23	4,992E-06	4,995E-06	-5,207E-04
24	4,986E-06	4,989E-06	-6,416E-04
25	4,986E-06	4,992E-06	-1,193E-03
26	4,986E-06	4,992E-06	-1,203E-03
27	4,986E-06	4,992E-06	-1,203E-03
28	4,986E-06	4,989E-06	-6,917E-04
29	4,987E-06	4,992E-06	-1,072E-03
30	4,986E-06	4,987E-06	-2,206E-04
<b>MÉDIA</b>	<b>4,987E-06</b>	<b>4,991E-06</b>	<b>-7,092E-04</b>

As Figuras 62 e 63 a seguir mostram a variação dos tempos de percurso da onda ultrassônica polarizada nas direções longitudinal e transversal, respectivamente.

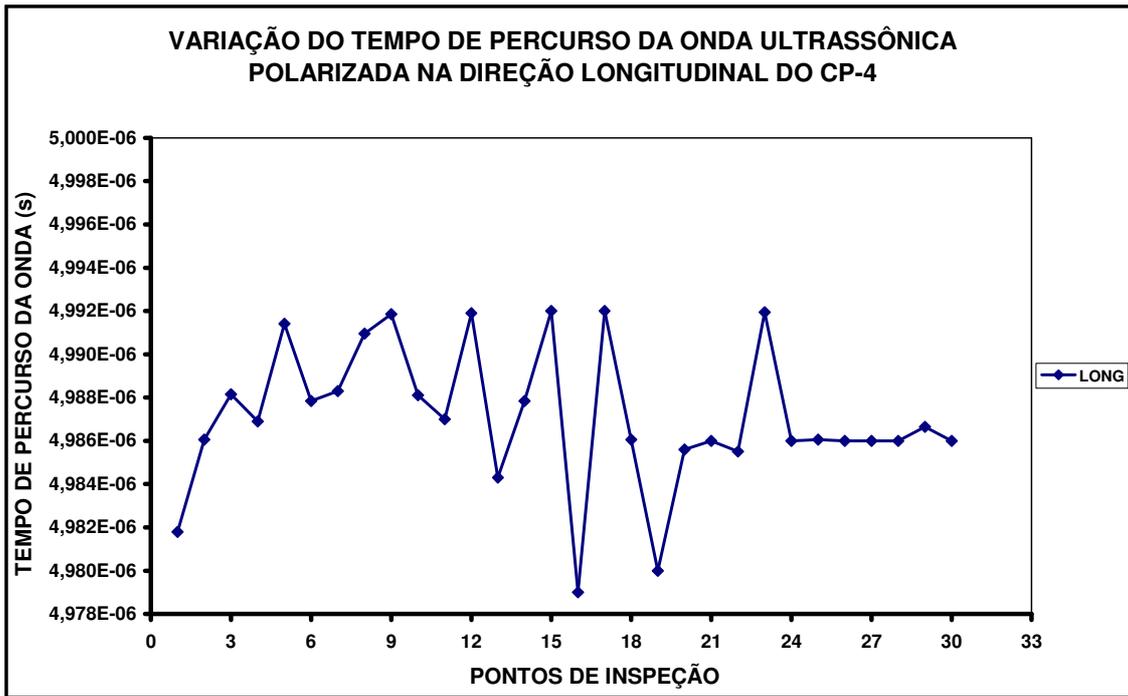


Figura 62 – Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção longitudinal pelos 30 pontos de inspeção localizados no CP-4

Na direção longitudinal a variação encontrada entre o tempo máximo e mínimo foi de 13 nanossegundos, e na transversal a variação foi de 18 nanossegundos.

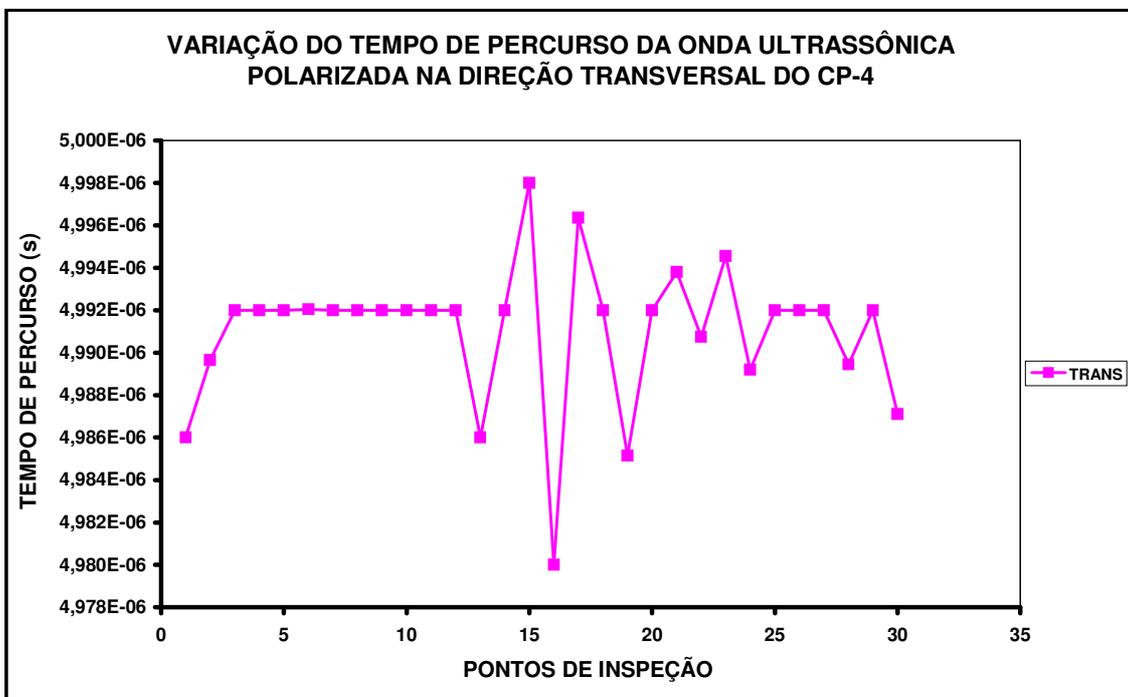


Figura 63 – Variação do tempo de percurso da onda ultrassônica polarizada na direção transversal pelos 30 pontos de inspeção localizados no CP-4

Os valores médios dos tempos de percurso nas duas direções foram: na longitudinal  $4,987E-06$  e na transversal  $4,991E-06$ .

Na busca pelo valor da birrefringência do material da bobina ( $B_{MAT}$ ), em cada um dos pontos foi feita a média entre os cinco tempos de percurso obtidos em cada direção. De posse da média dos tempos de percurso em cada direção, foi calculada a birrefringência acústica de cada ponto, empregando a equação 6. Para a obtenção da birrefringência do material ( $B_{MAT}$ ), determinada no CP-4, foi calculada a média entre as birrefringências obtidas nos trinta pontos de inspeção e obtido o valor de  $-7,807E-04$ . A Figura 64 mostra a variação do valor da birrefringência acústica pelos trinta pontos inspecionados do CP-4.

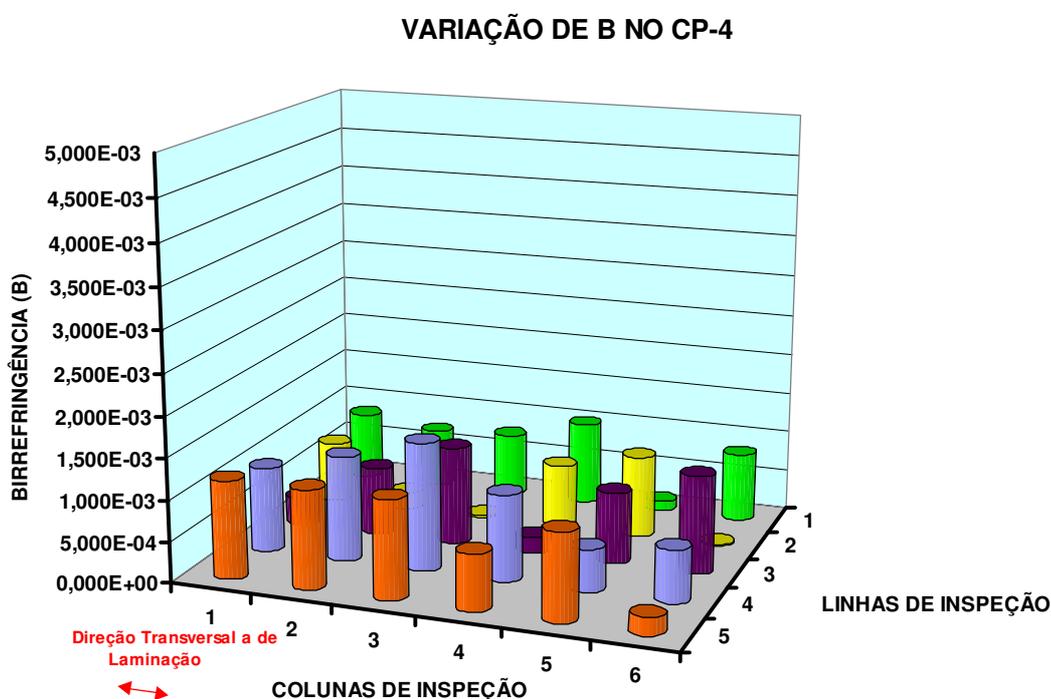


Figura 64 – Variação do valor da birrefringência acústica pelos trinta pontos inspecionados do CP-4

Comparando o valor médio encontrado para a birrefringência acústica ( $-7,807E-04$ ) do material em estudo extraído da bobina, com o obtido pelo material API 5L X70 avaliado por Magina [7] em quatro corpos-de-prova também extraídos de duas bobinas contendo o matéria-prima (variou de  $-2,03E-02$  a  $-2,87E-02$ ), verifica-se que a anisotropia do material em estudo é menor, apesar de apresentar uma certa dispersão conforme distribuição visualizada na Figura 64.

## 4.4 – AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DOS TUBOS

### 4.4.1 – ANTES DO TRATAMENTO TÉRMICO

Antes de passarem pela etapa de fabricação de tratamento térmico de têmpera/revenido, os seis tubos selecionados para o estudo foram retirados da linha de fabricação para marcação e identificação conforme item 3.4.1. A figura 65 ilustra a distribuição circunferencial dos cinco pontos de inspeção que foram avaliados ultrassonicamente seguindo a metodologia descrita no item 3.4.2.

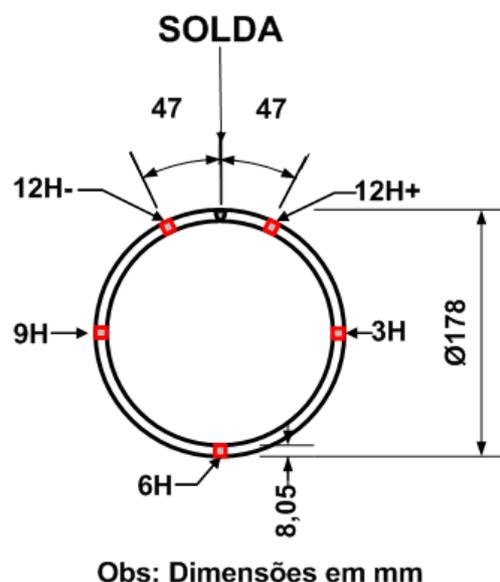


Figura 65 – Desenho mostrando a distribuição circunferencial dos cinco pontos de inspeção na região em estudo

O primeiro a ser ensaiado foi o Tubo 1 onde a sequência de inspeção nos pontos 12H+, 3H, 6H, 9H e 12H-, contidos na região selecionada e marcada para inspeção foi respeitada em todos os ensaios realizados. Seguindo a rotina de ensaio, cada sinal ultrassônico era capturado pelo osciloscópio em sua tela e logo em seguida transferido para o notebook pelo programa WaveStar. Foram gerados dez sinais em cada ponto de inspeção (cinco em cada direção de polarização da onda), dando um total de cinquenta sinais em cada região selecionada para estudo. Todos os sinais ultrassônicos foram processados, gerando os tempos de percurso correspondentes.

A Figura 66 mostra um dos seis tubos em inspeção no momento em que o técnico em ultrassom está posicionando o transdutor ultrassônico na direção de polarização da onda ultrassônica transversal ao comprimento do tubo.



Figura 66 – Transdutor ultrassônico cisalhante de incidência normal sendo posicionado para a captura de sinais ultrassônicos com a onda polarizada na direção transversal

A ordem de inspeção dos tubos foi sequencial, indo do Tubo 1 ao 6 – AT (Antes do Tratamento térmico). Os tempos médios de percurso da onda ultrassônica nas direções longitudinal e transversal, bem como os valores de B dos seis tubos em estudo, podem ser apreciados na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Resultados da primeira inspeção na linha de fabricação da indústria

<b>ENSAIO ULTRASSÔNICO: TUBOS - AT</b>				
<b>TUBOS</b>	<b>PONTOS</b>	<b>TEMPO DE PERCURSO DA ONDA (s)</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
		<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	
1	12H+	5,047E-06	5,058E-06	-2,108E-03
	3H	5,016E-06	5,028E-06	-2,399E-03
	6H	5,010E-06	5,018E-06	-1,665E-03
	9H	5,010E-06	5,021E-06	-2,263E-03
	12H-	5,028E-06	5,032E-06	-7,455E-04
	<b>MÉDIA</b>	<b>5,022E-06</b>	<b>5,031E-06</b>	<b>-1,836E-03</b>
2	12H+	5,015E-06	5,013E-06	2,493E-04
	3H	4,989E-06	4,998E-06	-1,832E-03
	6H	4,992E-06	4,992E-06	1,002E-05
	9H	4,992E-06	5,006E-06	-2,761E-03
	12H-	5,005E-06	5,015E-06	-1,896E-03
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,999E-06</b>	<b>5,005E-06</b>	<b>-1,246E-03</b>
3	12H+	5,025E-06	5,040E-06	-2,911E-03
	3H	5,004E-06	5,016E-06	-2,395E-03
	6H	4,999E-06	5,012E-06	-2,607E-03
	9H	5,012E-06	5,021E-06	-1,684E-03
	12H-	5,028E-06	5,028E-06	0,000E+00
	<b>MÉDIA</b>	<b>5,014E-06</b>	<b>5,023E-06</b>	<b>-1,920E-03</b>
4	12H+	5,027E-06	5,028E-06	-2,387E-04
	3H	4,996E-06	5,010E-06	-2,868E-03
	6H	4,943E-06	4,960E-06	-3,373E-03
	9H	5,010E-06	5,022E-06	-2,223E-03
	12H-	5,025E-06	5,012E-06	2,660E-03
	<b>MÉDIA</b>	<b>5,000E-06</b>	<b>5,006E-06</b>	<b>-1,209E-03</b>
5	12H+	5,005E-06	5,011E-06	-1,248E-03
	3H	4,983E-06	4,994E-06	-2,265E-03
	6H	4,992E-06	4,997E-06	-9,611E-04
	9H	4,996E-06	5,004E-06	-1,680E-03
	12H-	5,004E-06	5,009E-06	-9,588E-04
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,996E-06</b>	<b>5,003E-06</b>	<b>-1,423E-03</b>
6	12H+	4,998E-06	5,001E-06	-5,301E-04
	3H	4,979E-06	4,984E-06	-1,044E-03
	6H	4,980E-06	4,990E-06	-1,926E-03
	9H	4,986E-06	4,990E-06	-8,821E-04
	12H-	4,985E-06	4,993E-06	-1,694E-03
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,986E-06</b>	<b>4,992E-06</b>	<b>-1,215E-03</b>

A variação de B nos pontos de inspeção dos seis tubos em estudo é apresentada na Figura 67 a seguir onde o valor médio de B do material ( $B_{MAT}$ ) foi também inserido nos cinco pontos de inspeção, no intuito de facilitar a comparação do grau de anisotropia dos tubos em avaliação com o valor de anisotropia inicial existente na chapa da bobina.

No gráfico, o Tubo 4 apresenta a maior variação de B encontrada entre os cinco pontos de inspeção em comparação com os outros cinco tubos. A faixa de variação de B neste tubo inspecionado foi de  $6,033E-03$ , variando de  $-3,373E-03$  (Ponto 6H) a  $2,660E-03$  (Ponto 12H-). Além disso, esta é também a variação máxima considerando os valores de todas as birrefringências acústicas nos cinco pontos de inspeção dos seis tubos em estudo. Entre os tubos em estudo nesta fase de inspeção (AT), o Tubo 5 apresenta a menor variação de B ( $1,307E-03$ ).

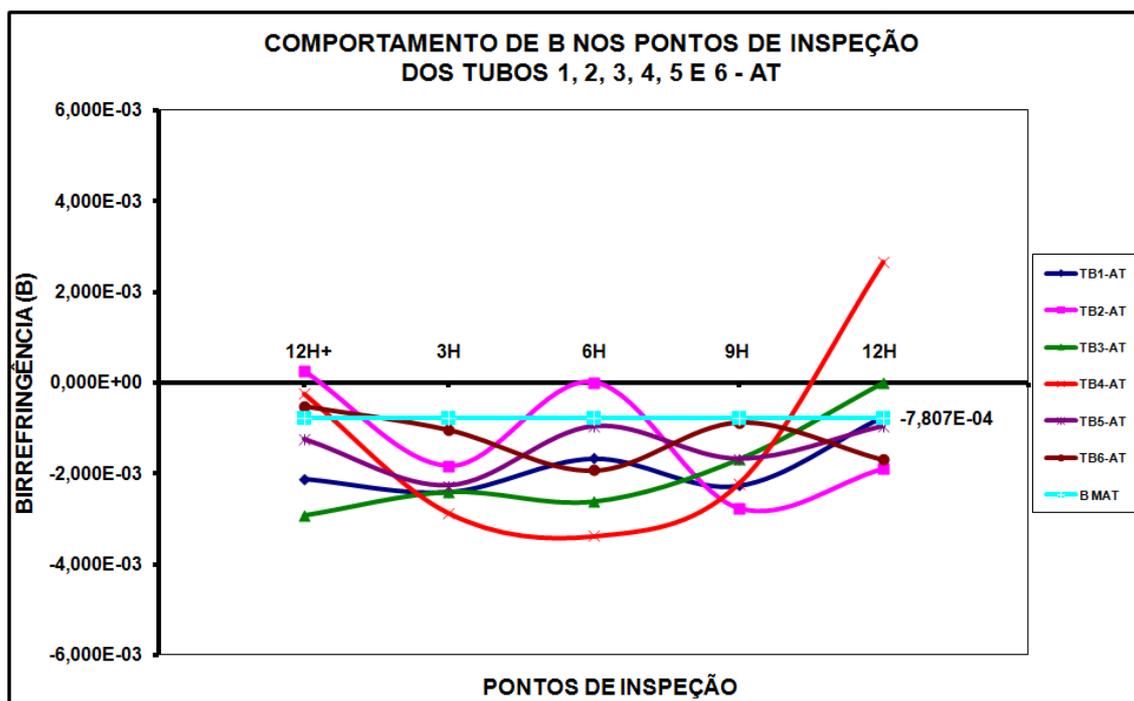


Figura 67 – Variação de B nos seis tubos (AT) em estudo

Nesta figura é verificado ainda que apenas 10% dos valores da birrefringência acústica se encontram acima de zero (Tubo 2 – AT nos pontos 12H+ e 6H e o Tubo 4 – AT no ponto 12H-).

O valor médio de B entre os seis tubos ( $-14,750E-04$ ) é 88,9% maior quando comparado ao B do material da bobina ( $-7,807E-04$ ), mostrando que o material dos tubos apresenta um elevado grau de anisotropia nesta etapa de avaliação antes do tratamento térmico de têmpera/revenido.

A Figura 68 adiante mostra que os valores de B encontrados nos seis tubos em estudo (API 5CT) nesta fase de fabricação são menores que os obtidos em tubos prontos do tipo Pipeline API 5LX-70, com solda, avaliados em outra oportunidade pela mesma técnica ultrassônica [7].

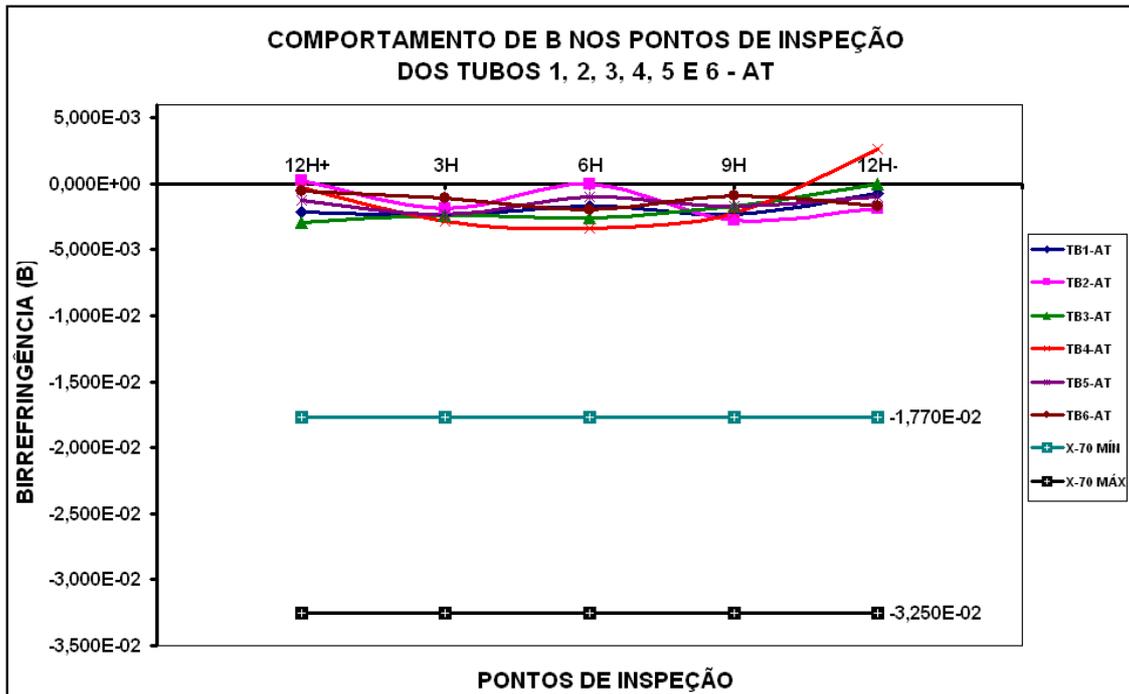


Figura 68 – Comparação da variação de B nos seis tubos OCTG em estudo com tubos Pipeline API 5LX-70 avaliados em outra oportunidade pela mesma técnica [7]

Comparando com os dados obtidos verifica-se que estes API 5LX-70 apresentam uma variação de B na faixa de  $-3,25E-02$  até  $-1,770E-02$  (variação de  $1,480E-02$ ), enquanto nos seis tubos em avaliação deste estudo ele varia de  $-3,373E-03$  a  $2,660E-03$  (variação de  $6,033E-03$ ). Se o ponto 12H- do Tubo 4 que mostra uma certa variação em relação a todos os outros pontos inspecionados, não for considerado, a variação do valor de B entre os pontos de inspeção dos seis tubos é menor ainda, indo de  $-3,373E-03$  a  $2,493E-04$  (variação de  $3,622E-03$ ).

Observando a diferença entre os tempos da onda polarizada na direção longitudinal com os da direção transversal também se constata que o valor é muito pequeno variando em até 17 ns, enquanto em alguns tubos API 5LX-70 avaliados por esta técnica ultrassônica encontra-se uma variação de até 222 ns [28].

Isto permite dizer que o material dos tubos do tipo API 5CT Grau N80Q em estudo, apresenta uma menor anisotropia em comparação com outros tubos já avaliados do tipo Pipeline API 5LX [7 e 28], usados para distribuição e condução de gás, petróleo e derivados.

Ao final desta primeira fase de inspeção na área de produção, os tubos tiveram suas extremidades pintadas com tinta automotiva branca e após a secagem foram transportados por uma ponte rolante para retornarem a linha de produção, sendo

posicionados de maneira ordenada para passarem pela etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido, conforme detalhado no item 3.4.3.

A Figura 69 mostra o instante em que os tubos 1, 2 e 3, já inspecionados e retirados dos cavaletes de aço se encontram posicionados sobre suportes de madeira aguardando o retorno para a linha de fabricação, estão tendo suas extremidades pintadas para facilitar o controle deles na linha.



Figura 69 – Tubos 1, 2 e 3 sendo pintados em suas extremidades para facilitar o controle dos mesmos na linha de fabricação

#### **4.4.2 – APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO**

Os tubos 4, 5 e 6 foram retirados da linha de produção, logo após a etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido para serem inspecionados por ultrassom mais uma vez, permanecendo sobre suportes de aço pertencentes à própria linha de produção, até alcançarem a temperatura ambiente. Os outros três tubos (1, 2 e 3), continuaram na linha de fabricação e seguiram para a etapa de desempenho a quente.

Os valores dos tempos médios de percurso da onda e da birrefringência acústica (B), bem como suas médias, pertencentes aos tubos 4, 5 e 6 após a etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido, se encontram na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Resultados da segunda inspeção na linha de fabricação da indústria

<b>ENSAIO ULTRASSÔNICO: TUBOS – DT</b>				
TUBOS	PONTOS	TEMPO DE PERCURSO DA ONDA (s)		BIRREFRINGÊNCIA
		LONGITUDINAL	TRANSVERSAL	
4	12H+	4,940E-06	4,949E-06	-1,790E-03
	3H	4,924E-06	4,920E-06	7,314E-04
	6H	4,865E-06	4,861E-06	7,403E-04
	9H	4,938E-06	4,942E-06	-8,805E-04
	12H-	4,944E-06	4,933E-06	2,187E-03
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,922E-06</b>	<b>4,921E-06</b>	<b>1,976E-04</b>
5	12H+	4,937E-06	4,938E-06	-2,430E-04
	3H	4,925E-06	4,920E-06	9,751E-04
	6H	4,932E-06	4,932E-06	0,000E+00
	9H	4,933E-06	4,943E-06	-1,944E-03
	12H-	4,937E-06	4,943E-06	-1,215E-03
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,933E-06</b>	<b>4,935E-06</b>	<b>-4,853E-04</b>
6	12H+	4,924E-06	4,931E-06	-1,441E-03
	3H	4,910E-06	4,920E-06	-1,953E-03
	6H	4,919E-06	4,915E-06	7,016E-04
	9H	4,914E-06	4,926E-06	-2,439E-03
	12H-	4,926E-06	4,926E-06	0,000E+00
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,919E-06</b>	<b>4,924E-06</b>	<b>-1,026E-03</b>

A Figura 70 apresenta um gráfico mostrando o comportamento da birrefringência acústica nos cinco pontos de inspeção dos tubos 4, 5 e 6, Depois do Tratamento Térmico de têmpera/revenido (DT).

Observe a relação do grau de anisotropia dos tubos com o valor médio de B do material ( $B_{MAT}$ ) inserido no gráfico, valor este da anisotropia inicial existente na bobina que deu origem aos tubos. Nesta etapa o valor médio de B dos três tubos (-4,379E-04) é 43,9% menor que o  $B_{MAT}$  (-7,807E-04), mostrando uma redução no grau de anisotropia existente nos tubos.

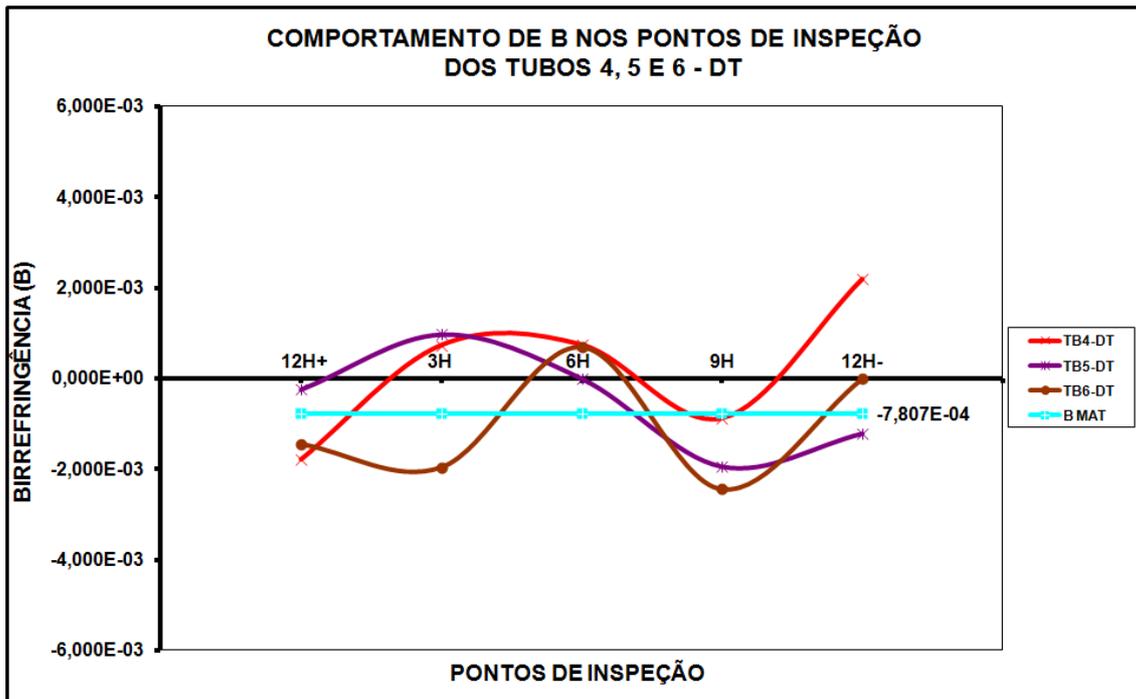


Figura 70 – Variação de B nos cinco pontos de inspeção Depois do Tratamento térmico de têmpera/revenido dos tubos 4, 5 e 6 (DT)

Comparando com o gráfico da Figura 67, é observado o efeito do tratamento térmico sobre o valor de B, mostrando curvas de tendência mais agrupadas com o valor de B em torno de zero, com valores limites e médios inferiores aos existentes antes do tratamento térmico. Aqui os valores de B nos pontos de inspeção dos três tubos depois do tratamento térmico apresentaram uma variação de  $4,626E-03$  ficando entre  $-2,439E-03$  (Tubo 6 / Ponto 9H) e  $2,187E-03$  (Tubo 4 / Ponto 12H-), enquanto antes do tratamento eles variavam  $6,033E-03$  indo de  $-3,373E-03$  (Tubo 4 / Ponto 6H) a  $2,660E-03$  (Tubo 4 / Ponto 12H-).

No Tubo 4 houve uma redução no valor da birrefringência nos cinco pontos de inspeção e a curva ficou em torno de B igual a zero, porém a variação máxima encontrada neste tubo entre os cinco pontos de inspeção continuou sendo maior que a encontrada nos outros dois tubos ( $3,977E-03$ ). Além disso, o ponto 6H de todos os tubos se aproximaram muito, tendo o do Tubo 5 apresentado o valor zero e os outros dois em torno de  $7,000E-04$ .

Isso evidencia que ocorreu uma redução da anisotropia média existente nos tubos em estudo (70,3% em relação à birrefringência média antes do tratamento), comprovando a eficiência do tratamento térmico, pois além de posicionar os valores médios de B de cada tubo depois do tratamento térmico, numa escala menor, o material aumenta a sua resistência mecânica passando o seu limite de escoamento mínimo de 55 Ksi para 80 Ksi.

#### 4.4.3 – APÓS O DESEMPENO A QUENTE

Os tubos 1, 2 e 3 passaram pela etapa de fabricação de tratamento térmico de têmpera/revenido e seguiram na linha passando ainda pela etapa de desempenho a quente após a qual foram retirados da linha de produção para sofrerem nova avaliação acustoelástica. Eles permaneceram apoiados sobre suportes de aço na lateral da própria linha de produção, até alcançarem a temperatura ambiente.

Os valores dos tempos médios de percurso da onda e da birrefringência acústica, bem como suas médias, dos tubos 1, 2 e 3 após a etapa de desempenho, se encontram na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12 – Resultados da terceira inspeção na linha de fabricação da indústria

<b>ENSAIO ULTRASSÔNICO: TUBOS - DD</b>				
<b>TUBOS</b>	<b>PONTOS</b>	<b>TEMPO DE PERCURSO DA ONDA (s)</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
		<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	
1	12H+	4,967E-06	4,975E-06	-1,609E-03
	3H	4,938E-06	4,944E-06	-1,214E-03
	6H	4,932E-06	4,938E-06	-1,216E-03
	9H	4,944E-06	4,950E-06	-1,213E-03
	12H-	4,980E-06	4,984E-06	-8,731E-04
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,952E-06</b>	<b>4,958E-06</b>	<b>-1,225E-03</b>
2	12H+	4,932E-06	4,938E-06	-1,216E-03
	3H	4,914E-06	4,924E-06	-1,952E-03
	6H	4,920E-06	4,926E-06	-1,219E-03
	9H	4,926E-06	4,932E-06	-1,217E-03
	12H-	4,942E-06	4,933E-06	1,792E-03
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,927E-06</b>	<b>4,931E-06</b>	<b>-7,623E-04</b>
3	12H+	4,950E-06	4,963E-06	-2,583E-03
	3H	4,950E-06	4,950E-06	0,000E+00
	6H	4,926E-06	4,932E-06	-1,238E-03
	9H	4,948E-06	4,956E-06	-1,686E-03
	12H-	4,950E-06	4,951E-06	-2,424E-04
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,945E-06</b>	<b>4,950E-06</b>	<b>-1,150E-03</b>

A Figura 71 apresenta num gráfico o comportamento da birrefringência acústica média nos cinco pontos de inspeção dos tubos 1, 2 e 3 Depois do Desempenho a quente (DD). Neste gráfico também foi inserido o B do material ( $B_{MAT}$ ) visando facilitar a comparação do grau de anisotropia dos tubos com o da chapa que originou os tubos.

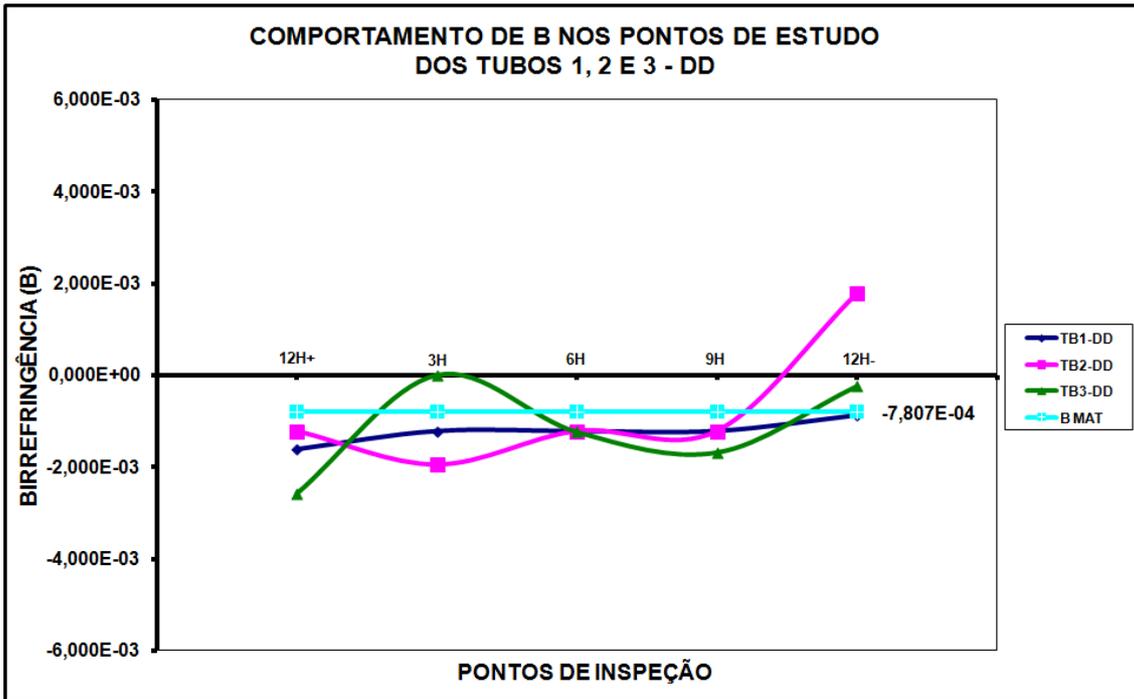


Figura 71 - Variação de B nos cinco pontos de inspeção depois da etapa de desempenho a quente dos tubos 1, 2 e 3

Comparando com a Figura 67 (tubos antes do tratamento térmico), verifica-se que após o desempenho a quente houve uma redução dos valores de B na maioria dos pontos inspecionados dos três tubos. Esta redução do grau de anisotropia foi de 29,1% em média, em relação ao existente antes do tratamento térmico (o  $B_{MÉDIO}$  caiu de  $-1,475E-03$  para  $-1,046E-03$ ). Vale lembrar que a redução da anisotropia nesta fase foi menor que após o tratamento térmico de têmpera/revenido (70,3%).

Nos pontos 6H os valores das birrefringências acústicas estão muito próximos e podem ser considerados iguais (ver Tabela 12). Este fato ocorreu também com tubos de aço do tipo Pipeline API 5LX-70 [7], porém com uma diferença, a de que nos tubos após o desempenho a quente os pontos 6H não apresentam o mesmo valor de B determinado no material da bobina ( $B_{MAT}$ ).

A variação da birrefringência acústica encontrada entre os três tubos após o desempenho a quente foi de  $3,744E-03$ , indo de  $-2,583E-03$  (Tubo 3 / Ponto 12H+) até  $1,792E-03$  (Tubo 2 / Ponto 12H-).

A maior variação de B entre os cinco pontos inspecionados de um tubo depois do desempenho a quente ocorreu no Tubo 2 e foi de  $3,924E-03$  ( $-1,952E-03$  no ponto 3H até  $1,792E-03$  no ponto 12H-).

Oitenta e sete por cento dos valores de B encontrados nos três tubos ficaram entre 0 e  $-1,952E-03$ . Somente o ponto 12H- do Tubo 2 apresentou um valor de B acima de zero.

Para retratar visualmente a variação ocorrida com o grau de anisotropia do material dos tubos, desde a bobina até após a etapa de fabricação dos tubos de desempenho a quente, a Figura 72 a seguir mostra as variações observadas em todas as etapas.

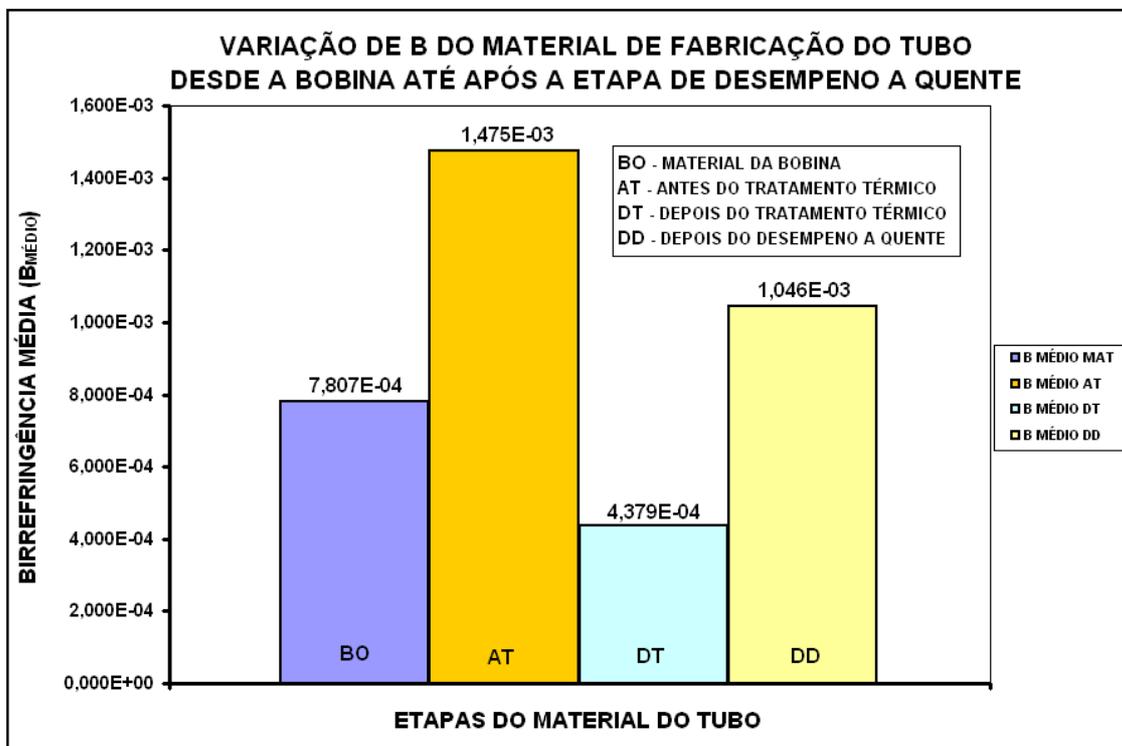


Figura 72 – Variação da anisotropia do material durante as etapas avaliadas acustoelasticamente

Conforme o descrito no item 3.4.6, ao final da terceira inspeção ultrassônica na linha de fabricação o Tubo 1 foi transportado para um setor e por corte foi extraído o Corpo-de-prova Final (CP-F), contendo ao centro de seu comprimento de 400 mm, os cinco pontos já inspecionados, como mostrado na Figura 49.

#### 4.5 – DETERMINAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NO TUBO

Como descrito no item 3.5.2, através do CP-F extraído do Tubo 1, foi possível realizar uma comparação entre o resultado obtido pela metodologia oferecida pela norma ASTM E1928-07 [44] para estimar a tensão residual circunferencial em um tubo e o valor obtido pelo método ultrassônico, utilizando a técnica da birrefringência acústica.

#### **4.5.1 – AVALIAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NO TUBO SEGUNDO A NORMA ASTM E1928-07**

O corpo-de-prova CP-F foi transportado da APOLO TUBULARS S.A. para o Laboratório de Metrologia do IEN/CNEN (LAMET/IEN). Antes do CP-F passar pela operação de corte foram marcadas e identificadas as regiões e os pontos usados como referências para obtenção dos dados necessários ao método sugerido pela norma ASTM E1928-07 [44].

Após a marcação das linhas e pontos conforme o item 3.5.2.2 foram executadas as medições do diâmetro externo inicial ( $D_0$ ) do CP-F (Tabela 13), entre os pontos de contato a  $90^\circ$  da solda posicionados nas quatro regiões marcadas e identificadas, antes da realização da operação de corte por fresa do CP-F ao longo de seu comprimento.

Tabela 13 - Diâmetro externo inicial ( $D_0$ ) do CP-F

<b>DIÂMETRO EXTERNO INICIAL - CP-F</b>				
<b>MEDIÇÃO</b>	<b>REGIÃO A</b>	<b>REGIÃO B</b>	<b>REGIÃO C</b>	<b>REGIÃO D</b>
<b>1</b>	<b>179,26</b>	<b>179,04</b>	<b>179,14</b>	<b>179,16</b>
<b>2</b>	<b>179,26</b>	<b>179,02</b>	<b>179,14</b>	<b>179,14</b>
<b>3</b>	<b>179,28</b>	<b>179,02</b>	<b>179,14</b>	<b>179,14</b>
<b>4</b>	<b>179,26</b>	<b>179,02</b>	<b>179,16</b>	<b>179,14</b>
<b>5</b>	<b>179,26</b>	<b>179,02</b>	<b>179,14</b>	<b>179,14</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>179,26</b>	<b>179,02</b>	<b>179,14</b>	<b>179,14</b>
<b>MÉDIA FINAL</b>	<b><math>D_0 = 179,14</math> mm</b>			

A variação apresentada pelo  $D_0$  do CP-F foi de 0,26 mm, indo de 179,02 a 179,28 mm. O valor do diâmetro externo inicial encontrado pela média foi de 179,14 mm. Seguindo orientação dada pela metodologia descrita na norma, o CP-F teria que sofrer uma operação de corte para a obtenção dos demais parâmetros necessários para o cálculo estimativo da tensão residual circunferencial existente no Tubo 1, tais como, o diâmetro externo final ( $D_F$ ) do CP após o corte e a espessura média da parede do tubo em inspeção. Com estes dados, a simples aplicação dos mesmos na fórmula 10 permitiria calcular a tensão. Assim, o CP-F foi liberado para a operação de usinagem ser realizada.

Após a conclusão da etapa de medição inicial, o CP-F foi liberado e levado para a Oficina Mecânica do IEN/CNEN, para ser realizado o corte pelo processo de usinagem por fresamento frontal. Esta operação foi realizada na linha 12H marcada

sobre a solda do CP. Seguindo orientação da norma, o corte pode ser feito em qualquer região do CP desde que nenhuma variação da espessura seja verificada ou na região onde esta ocorrer [44]. Apesar do CP não apresentar visualmente variação de espessura circunferencial, foi selecionada a região da solda para ser usinada por ser tratar da região em que ocorreu a união das extremidades do material na formação do tubo a elevada temperatura, gerando uma pequena zona termicamente afetada (ZTA) em torno de 4 mm (Figura 73).

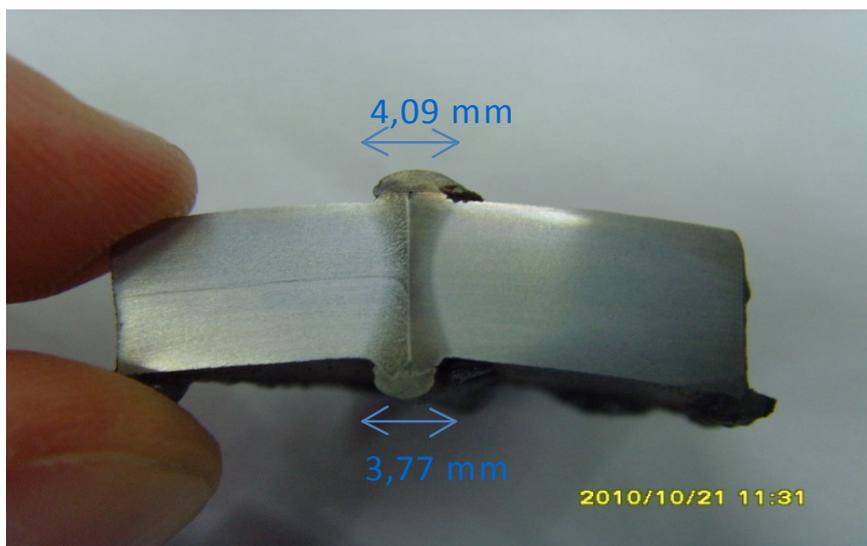


Figura 73 – Imagem da ZTA determinada logo após o processo de soldagem por indução ocorrer para a união do tubo

Para a realização da usinagem foram confeccionados fixadores de aço apropriados em forma de cunha de modo que nenhum esforço de abertura ou fechamento no CP-F sofresse interferência por sua fixação. A Figura 74 apresenta o CP no momento em que está sendo usinado por uma fresa de topo de 6 mm de diâmetro.

Os passos e avanços aplicados foram muito pequenos para evitar desgaste da ferramenta e principalmente qualquer esforço sobre o CP-F, conforme detalhamento no item 3.5.2.2.



Figura 74 - CP-F sendo usinado por uma fresa de topo com arestas de corte helicoidais durante a operação de corte

A Figura 75 mostra o CP-F com o rasgo completamente realizado, identificado agora como CP-F-RA. No detalhe, pedaços de cavaco ainda presos ao CP, mostrando também que a tensão residual circunferencial que existia no CP-F era trativa, pois o tubo se abriu no final do corte, fazendo um som metálico no momento da abertura [44].



Figura 75 - CP-F logo após a confecção do rasgo por fresamento passando a ser denominado de CP-F-RA

Após a operação de corte realizado por fresamento foram realizadas as medições necessárias para a determinação do diâmetro externo final ( $D_F$ ) e da espessura média ( $e$ ), seguindo orientação da norma ASTM E1928-07. Estes dados dimensionais complementares são necessários para o cálculo estimativo da tensão residual circunferencial, empregando a Equação 10 dada pela norma.

A medição do  $D_F$  do CP foi realizada como descrita no item 3.5.2.2. O valor do  $D_F$  obtido no CP-F-RA foi de 180,32 mm. Os dados estão contidos na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14 – Diâmetro externo final ( $D_F$ ) do CP-F-RA

<b>DIÂMETRO EXTERNO FINAL - CP-F-RA</b>				
<b>MEDIÇÃO</b>	<b>REGIÃO A</b>	<b>REGIÃO B</b>	<b>REGIÃO C</b>	<b>REGIÃO D</b>
<b>1</b>	<b>180,32</b>	<b>180,32</b>	<b>180,36</b>	<b>180,28</b>
<b>2</b>	<b>180,32</b>	<b>180,32</b>	<b>180,36</b>	<b>180,28</b>
<b>3</b>	<b>180,32</b>	<b>180,32</b>	<b>180,36</b>	<b>180,26</b>
<b>4</b>	<b>180,32</b>	<b>180,34</b>	<b>180,36</b>	<b>180,28</b>
<b>5</b>	<b>180,32</b>	<b>180,32</b>	<b>180,36</b>	<b>180,28</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>180,32</b>	<b>180,32</b>	<b>180,34</b>	<b>180,28</b>
<b>MÉDIA FINAL</b>	<b><math>D_F = 180,32</math> mm</b>			

A determinação da espessura média da parede do tubo ( $e$ ) foi obtida seguindo a descrição feita no item 3.5.2.2. Os dados obtidos para a determinação de “ $e$ ” constam na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 - Espessura da parede ( $e$ ) do CP-F-RA

<b>ESPESSURA DA PAREDE DO CP-F-RA (<math>e</math>)</b>				
<b>MEDIÇÃO</b>	<b>REGIÃO A</b>	<b>REGIÃO B</b>	<b>REGIÃO C</b>	<b>REGIÃO D</b>
<b>1</b>	<b>8,06</b>	<b>8,06</b>	<b>8,02</b>	<b>8,00</b>
<b>2</b>	<b>8,06</b>	<b>8,04</b>	<b>8,02</b>	<b>8,02</b>
<b>3</b>	<b>8,04</b>	<b>8,04</b>	<b>8,04</b>	<b>8,02</b>
<b>4</b>	<b>8,06</b>	<b>8,04</b>	<b>8,02</b>	<b>7,98</b>
<b>5</b>	<b>8,04</b>	<b>8,04</b>	<b>8,02</b>	<b>8,00</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>8,06</b>	<b>8,04</b>	<b>8,02</b>	<b>8,00</b>
<b>MÉDIA FINAL</b>	<b><math>e = 8,03</math> mm</b>			

Com a determinação dos parâmetros necessários para o cálculo do valor da tensão residual circunferencial existente no Tubo 1, tais como, diâmetros externos inicial ( $D_0 = 179,14$  mm) e final ( $D_F = 180,32$  mm), e da espessura média da parede do tubo ( $e = 8,03$  mm), foi realizado o cálculo empregando estes dados obtidos na

equação 10 [44]. Para o módulo de elasticidade (E) foi considerado o valor de 21.000 Kgf/mm<sup>2</sup> e para o coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) o valor de 0,3 [45]. O valor final encontrado para a tensão residual circunferencial existente no Tubo 1 por esta metodologia foi de  $\pm 6,74$  Kgf/mm<sup>2</sup>.

#### 4.5.2 – DETERMINAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL POR ULTRASSOM

Para determinar ultrassonicamente a tensão residual existente no Tubo 1 inspecionado após o desempenho a quente foi necessário realizar primeiro uma avaliação acustoelástica nos cinco pontos de inspeção do CP-F com rasgo (12H+, 3H, 6H, 9H e 12H-) para obtenção do valor da birrefringência acústica existente.

O CP-F com rasgo (CP-F-RA) foi levado para o LABUS IEN/CNEN, para serem avaliados novamente os cinco pontos pelo sistema ultrassônico. Depois da captura e transferência dos sinais ultrassônicos, eles foram processados e com o produto final (tempos de percurso da onda ultrassônica nas duas direções de polarização), foram obtidos os valores de B pela equação 6.

A Tabela 16 mostra a relação dos pontos de inspeção com os respectivos tempos médios de percurso da onda ultrassônica, nas duas direções de polarização, o valor das birrefringências acústicas calculadas para cada par de tempos, e na última linha a média geral encontrada no CP-F com rasgo (CP-F-RA).

Tabela 16 – Tempos e birrefringências dos pontos em inspeção do CP-F-RA

<b>TEMPOS E BIRREFRINGÊNCIA NO CP-F-RA</b>				
<b>CP</b>	<b>PONTO</b>	<b>LONGITUDINAL (s)</b>	<b>TRANSVERSAL (s)</b>	<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
<b>CP-F-RA</b>	<b>12H+</b>	<b>4,975E-06</b>	<b>4,981E-06</b>	<b>-1,266E-03</b>
	<b>3H</b>	<b>4,950E-06</b>	<b>4,950E-06</b>	<b>-1,010E-05</b>
	<b>6H</b>	<b>4,940E-06</b>	<b>4,944E-06</b>	<b>-6,273E-04</b>
	<b>9H</b>	<b>4,950E-06</b>	<b>4,950E-06</b>	<b>-1,010E-05</b>
	<b>12H-</b>	<b>4,986E-06</b>	<b>4,988E-06</b>	<b>-3,509E-04</b>
	<b>MÉDIA</b>	<b>4,960E-06</b>	<b>4,962E-06</b>	<b>-4,528E-04</b>

De posse dos valores de B nos pontos em inspeção do CP-F com rasgo, foi confeccionado um gráfico (Figura 76) apresentando a variação das três curvas de tendência obtidas pelos cinco pontos inspecionados nas fases do Tubo 1 como AT (antes do tratamento térmico), DD (depois do desempenho a quente) e CP-F-RA (corpo-de-prova final com rasgo).

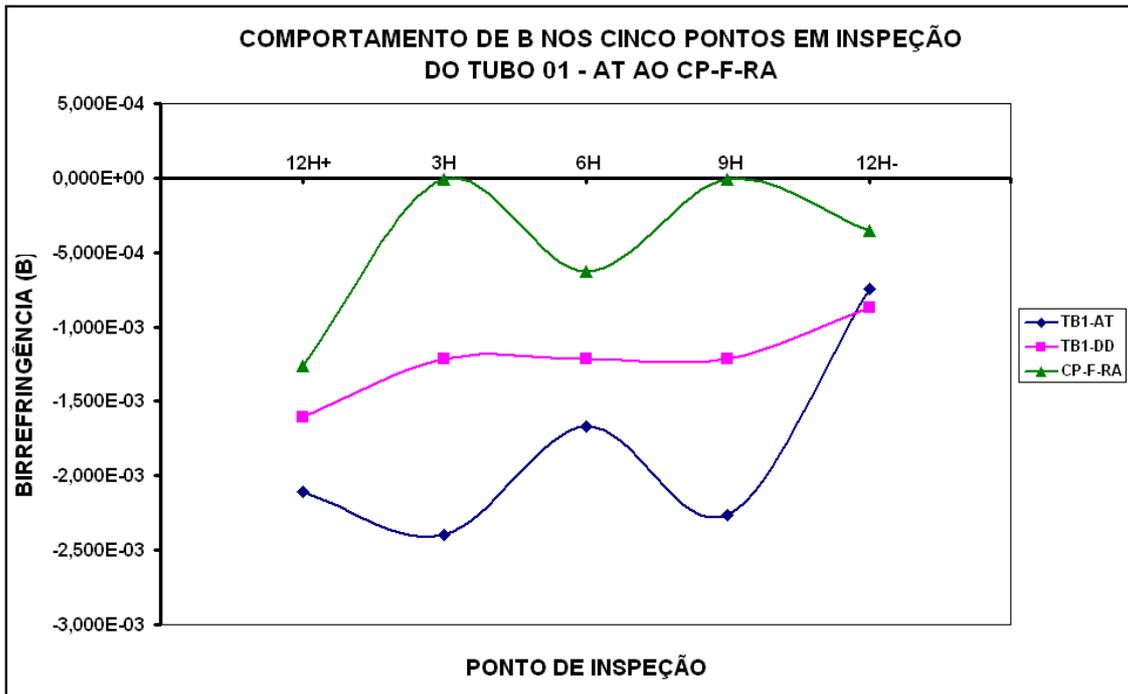


Figura 76 - Variação de B do Tubo 1 nas três etapas de inspeção (AT, DD e CP-F-RA)

Comparando a curva de tendência formada pelos cinco pontos de inspeção do Tubo 1 após o desempenho com a curva de tendência do CP-F com rasgo, é observada uma redução na anisotropia existente no tubo, pois houve redução da birrefringência acústica em todos os pontos de inspeção (12H+, 3H, 6H, 9H e 12H-). Os pontos 3H e 9H apresentaram um valor para B de  $-1,01E-05$ , muito próximo de zero. O  $B_{MÉDIO}$  do Tubo 1 após o desempenho a quente que era de  $-1,225E-03$  caiu para  $-4,529E-04$  após o corte.

Com os dados envolvidos na construção das curvas de tendência do Tubo 1 nas fases após o desempenho a quente e como CP-F com rasgo, foi realizada uma avaliação do nível de tensão residual existente. Considerando como birrefringência inicial ( $B_0$ ) o valor de B encontrado para o material da bobina ( $B_{MAT}$ ) obtido no item 4.2, usando a constante acustoelástica determinada no item 4.3 e os valores de B de cada ponto de inspeção, foram calculados os valores da tensão existente em cada um dos cinco pontos inspecionados no Tubo 1 após o desempenho e no CP-F com rasgo, usando a equação 9.

Subtraindo da tensão encontrada em cada ponto de inspeção do Tubo 1 após o desempenho o valor da tensão no ponto correspondente do CP-F com rasgo, foi determinado o valor da tensão residual existente em cada ponto do Tubo 1 após o desempenho a quente. Subtraindo da tensão média encontrada para o Tubo 1 depois

do desempenho o valor da tensão média calculada para o CP-F com rasgo, foi determinado o valor da tensão residual média existente no Tubo 1 após o desempenho.

Como o CP-F se abriu após a operação de usinagem por fresamento, significando que o Tubo 1 após o desempenho se encontrava no estado trativo [46], e como pela operação de subtração foi encontrado o sinal negativo em sua tensão média, visando atender a convenção de valor positivo para a tensão trativa e negativo para a compressiva, os valores de tensão calculados pela técnica da birrefringência acústica foram multiplicados por menos um. Assim, a tensão média calculada para o Tubo 1 – DD passou a 8,46 Kgf/mm<sup>2</sup> (considerada trativa), e a do CP-F com rasgo passou a -3,59 Kgf/mm<sup>2</sup> (compressiva).

A Tabela 17 a seguir mostra os valores de tensão (multiplicados por menos um) encontrados nos pontos de inspeção no Tubo 1 depois do desempenho (DD) e no CP-F com rasgo (CP-F-RA) e as respectivas médias, considerando como B<sub>0</sub> o B<sub>MAT</sub>.

Tabela 17 – Valores de Tensão encontrados nos cinco pontos de inspeção no Tubo 1 - DD e no CP-F-RA e suas médias considerando B<sub>0</sub> = B<sub>MAT</sub>

B <sub>MAT</sub>	A (Kgf/mm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup>	PONTO	TUBO 1 - DD		CP-F-RA	
			B <sub>TB1-DD</sub>	TENSÃO (Kgf/mm <sup>2</sup> )	B <sub>CP-F-RA</sub>	TENSÃO (Kgf/mm <sup>2</sup> )
-7,807E-04	9,127E-05	12H+	-1,609E-03	9,08	-1,266E-03	5,32
		3H	-1,214E-03	4,74	-1,010E-05	-8,44
		6H	-1,216E-03	4,77	-6,273E-04	-1,68
		9H	-1,213E-03	4,74	-1,010E-05	-8,44
		12H-	-8,731E-04	1,01	-3,509E-04	-4,71
<b>MÉDIA</b>			<b>-1,225E-03</b>	<b>4,87</b>	<b>-4,528E-04</b>	<b>-3,59</b>

Com os valores das tensões da Tabela 17 foi montado um gráfico, apresentado na Figura 77, com as duas curvas de tendência das tensões existentes nas situações do Tubo 1 após o desempenho e do CP-F com rasgo.

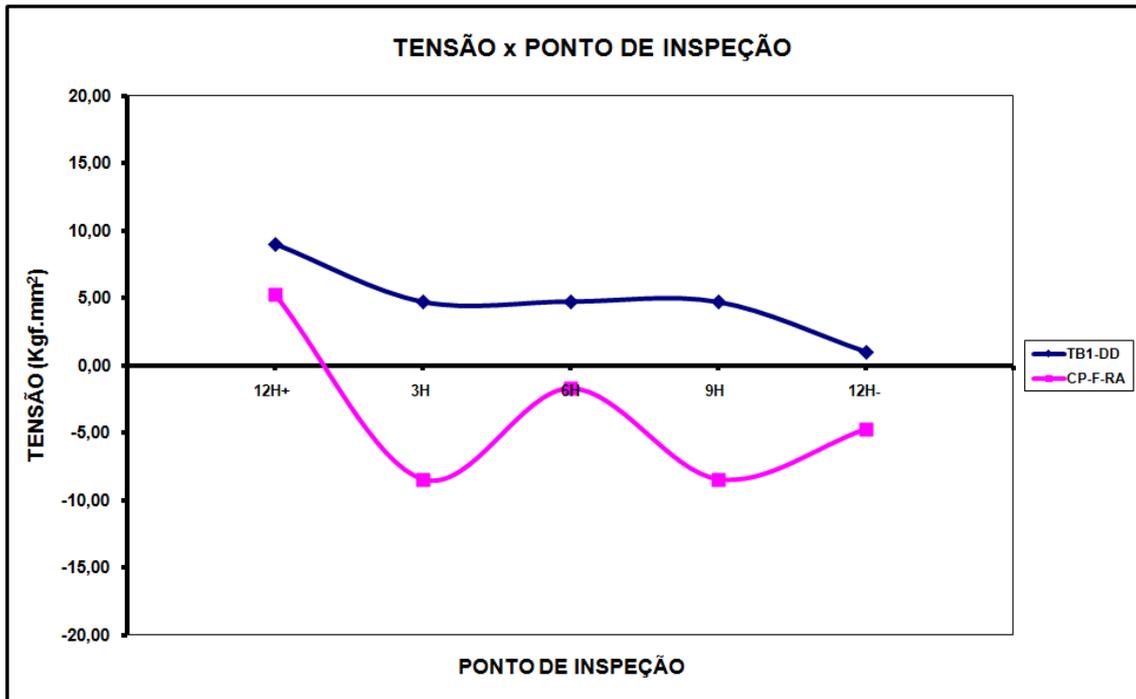


Figura 77 – Comportamento da Tensão existente nos pontos de inspeção do Tubo 1 – DD e do CP-F-RA

A seguir a Tabela 18 apresenta os valores de tensão residual existentes nos pontos de inspeção do Tubo 1 – DD, valores estes obtidos pela subtração das tensões apresentadas na Tabela 17.

Tabela 18 – Valores de tensão residual existentes nos cinco pontos de inspeção no Tubo 1 – DD e sua média ( $B_0 = B_{MAT}$ )

PONTO	TENSÃO <sub>RESIDUAL</sub> TB1 – DD (Kgf/mm <sup>2</sup> )
12H+	3,76
3H	13,19
6H	6,45
9H	13,18
12H-	5,72
<b>MÉDIA</b>	<b>8,46</b>

A Figura 78 mostra a curva de variação da tensão residual existente no Tubo 1 após o desempenho confeccionada com os valores de tensão da Tabela 18.

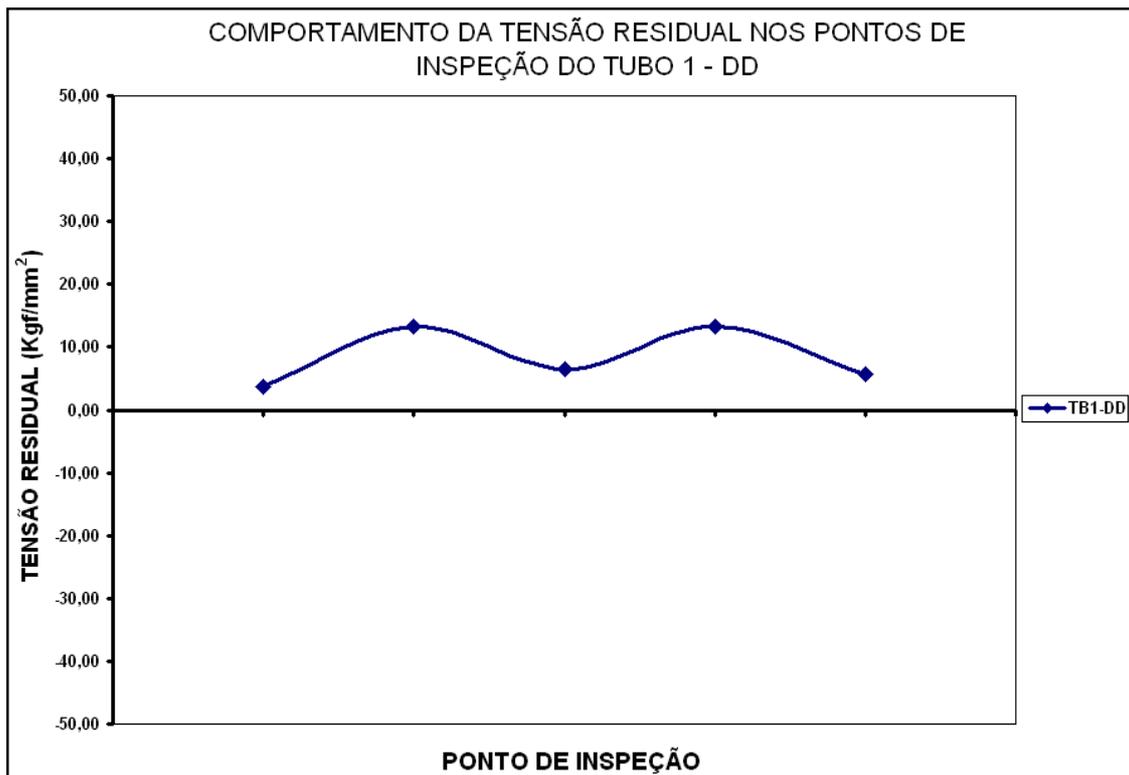


Figura 78 – Comportamento da tensão residual nos pontos de inspeção do Tubo 1 – DD

Considerando agora como  $B_0$  o valor de  $B$  encontrado no CP-F com rasgo em cada ponto de inspeção, e como  $B$  os valores de birrefringência acústica obtidos em cada ponto de inspeção do Tubo 1 após o desempenho, quando aplicados na equação 9 junto com a constante acustoelástica, foram determinados os valores da tensão residual existente em cada um dos cinco pontos inspecionados do Tubo 1 depois do desempenho (Tabela 19). O que chamou a atenção foi que os valores calculados para os cinco pontos são iguais aos encontrados pelo outro método usado no cálculo da tensão residual do Tubo 1 após o desempenho. Conseqüentemente, o resultado da média dos valores de tensão nos cinco pontos inspecionados do Tubo 1 após o desempenho a quente foi o mesmo encontrado pela metodologia de cálculo aplicada anteriormente, ou seja,  $8,46 \text{ Kgf/mm}^2$ .

Os valores das tensões calculadas em cada ponto de inspeção do Tubo 1 após o desempenho, bem como as médias das birrefringências utilizadas e das tensões, estão na Tabela 19 a seguir.

Tabela 19 – Tensão residual média no Tubo 1 - DD considerando  $B_0 = B_{CP-F-RA}$

$A$ (Kgf/mm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup>	PONTO	$B_0 = B_{CP-F-RA}$	$B_{TB1-DD}$	Tensão <sub>TB1-DD</sub> (Kgf/mm <sup>2</sup> )
	12H+	-1,266E-03	-1,609E-03	3,76
	3H	-1,010E-05	-1,214E-03	13,19
9,127E-05	6H	-6,273E-04	-1,216E-03	6,45
	9H	-1,010E-05	-1,213E-03	13,18
	12H-	-3,509E-04	-8,731E-04	5,72
	<b>MÉDIA</b>	<b>-4,528E-04</b>	<b>-1,225E-04</b>	<b>8,46</b>

Devido à coincidência entre os valores determinados pelos dois métodos adotados para obtenção dos valores de tensão residual, foi realizada uma avaliação matemática e a conclusão foi que as duas metodologias utilizadas são algebricamente as mesmas.

Na metodologia da subtração das tensões para o cálculo da tensão residual no Tubo 1 após a etapa de desempenho, se forem colocadas as equações usadas para o cálculo da tensão (equação 9) em cada situação e subtrairmos, restará apenas:

$$\sigma_{TB1-DD} - \sigma_{CP-F-RA} = \frac{(B_{TB1-DD} - B_{CP-F-RA})}{A} \quad (11)$$

onde:

$\sigma_{TB1-DD}$  é a tensão no Tubo 1 após a etapa de desempenho a quente e  $\sigma_{CP-F-RA}$  é a tensão no CP-F com rasgo.

Assim, o valor encontrado de B para o CP-F com rasgo ( $B_{CP-F-RA}$ ) na equação 11 assume o papel de  $B_0$  da equação 9 e permite realizar o cálculo direto da tensão residual existente no Tubo 1 depois da etapa de desempenho a quente. Logo, ele pode ser considerado como o  $B_0$  do Tubo 1 após o desempenho a quente.

Avaliando o nível mais elevado de tensão residual de 13,19 Kgf/mm<sup>2</sup> encontrado no ponto 3H do Tubo 1 depois da etapa de desempenho a quente, é verificado que o mesmo atingiu 23% do valor de limite de escoamento do tubo (80 Ksi ou 56,24 Kgf/mm<sup>2</sup>). Pelo valor médio de tensão residual de 8,46 Kgf/mm<sup>2</sup> encontrado no Tubo 1 desempenado, este percentual ficou em 15% do limite de escoamento.

Comparando os valores de tensão da Tabela 17 para o Tubo 1 após a etapa de desempenho a quente, com os encontrados por Magina nos tubos API 5LX-70 [7], verifica-se que o nível de tensão existente no Tubo 1 é bem mais baixo, variando de 1,01 a 9,08 Kgf/mm<sup>2</sup>, enquanto os tubos API 5LX-70 variaram de -50,6 a 51,4 Kgf/mm<sup>2</sup>. Num ponto inspecionado do Tubo 2 Fim de Magina [7], o nível de tensão alcançou 51,40 Kgf/mm<sup>2</sup> e para um tubo com um limite de escoamento de 72,23 Ksi

(50,78 Kgf/mm<sup>2</sup>) isto significa que a tensão existente neste ponto estava acima desse limite.

Isso mostra o baixo nível de tensão existente no tubo OCTG do tipo Casing API 5CT Grau N80Q em estudo, fabricado pela APOLO TUBULARS. Isso ficou evidenciado desde o início do estudo pelos baixos valores encontrados de birrefringência acústica, mostrando o baixo grau de anisotropia existente em todos os seis tubos.

Comparando a variação do grau de anisotropia do Tubo 1 após o desempenho a quente com as variações encontradas nos tubos API 5LX-46 de Cardoso [6] é constatado mais uma vez, o baixo nível de anisotropia do tubo OCTG (Tabela 20).

Tabela 20 – Valores da birrefringência nos pontos de inspeção dos tubos API 5L [6] e do Tubo 1 - DD em estudo

TUBO	PONTO	BIRREFRINGÊNCIA
X46 S/ SOLDA	12H	2,415E-04
	3H	-1,223E-04
	6H	3,234E-04
	9H	-5,376E-04
	MÉDIA	-2,375E-05
X46 C/ SOLDA	12H+	-6,627E-03
	3H	-6,519E-03
	6H	-8,226E-03
	9H	-7,326E-03
	12H-	-6,492E-03
	MÉDIA	-7,038E-03
N80Q C/ SOLDA	12H+	-1,609E-03
	3H	-1,214E-03
	6H	-1,216E-03
	9H	-1,213E-03
	12H-	-8,731E-04
	MÉDIA	-1,225E-03

A Figura 79 mostra a variação do nível de birrefringência acústica entre os dois tubos API 5LX-46 avaliados por Cardoso [6] e o Tubo 1 após o desempenho a quente em estudo.

O tubo OCTG do tipo Casing API 5CT-N80Q, com solda, apresenta um nível de anisotropia muito baixo quando comparado com o API 5LX-46 com solda, e muito próximo do outro API 5L sem solda [6], que tem o valor médio de B igual a zero.

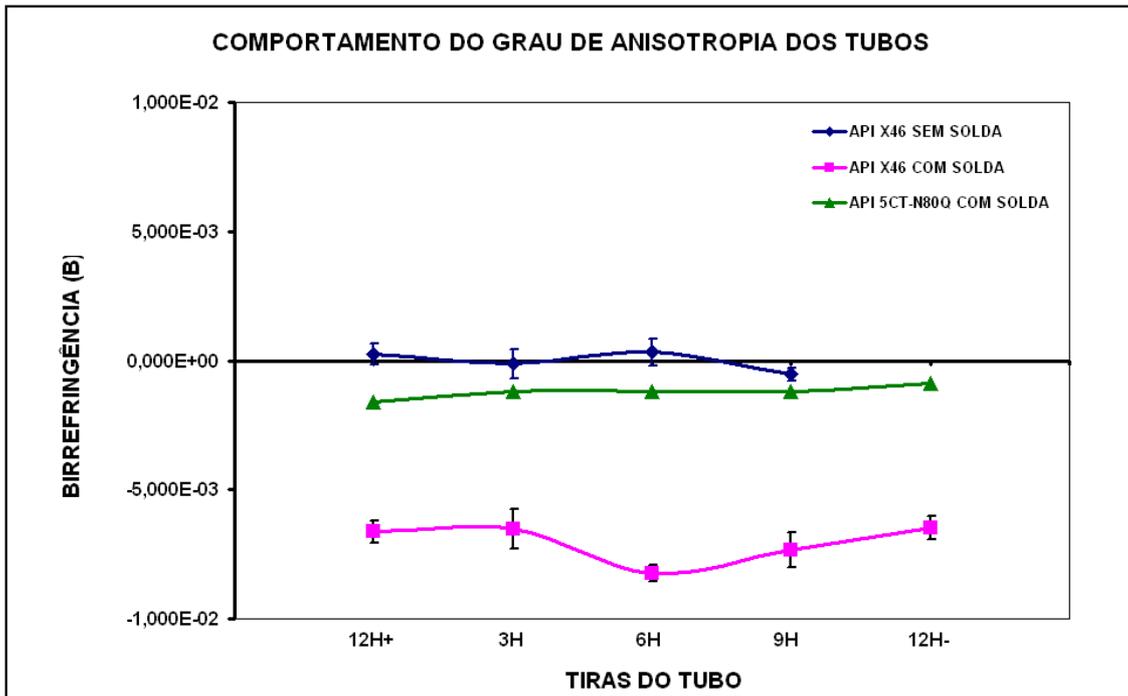


Figura 79 – Comparação do grau de anisotropia entre dois tubos API 5LX-46 (com e sem solda) [6] com o Tubo 1 – DD em estudo (com solda)

Comparando em módulo o valor de tensão residual determinado pela técnica ultrassônica da birrefringência acústica ( $8,46 \text{ Kgf/mm}^2$ ) com o estimado pelo método da norma ASTM E1928-07 ( $\pm 6,74 \text{ Kgf/mm}^2$ ), em relação ao limite de escoamento do material ( $\sigma_e = 56,24 \text{ Kgf/mm}^2$ ), é verificada uma diferença aproximada de 3% entre os dois valores, pois pelo processo ultrassônico a tensão residual alcançou 15% do limite de escoamento enquanto a estimada pela norma deu 12%. Isso confirma que a técnica ultrassônica da birrefringência acústica é uma ferramenta não destrutiva e disponível a partir de agora para ser usada na determinação da tensão residual média existente num duto OCTG em serviço. Deve ser levado ainda em consideração que a metodologia da norma ASTM E1928-07 é para estimar de modo aproximado o valor da tensão residual circunferencial existente num tubo, e que o comprimento do CP em avaliação era menor que o indicado pela norma [44]. Dessa maneira a técnica ultrassônica mostra sua precisão na avaliação da tensão residual existente num tubo.

## ***CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES***

Este estudo objetivou a avaliação acustoelástica de tubos OCTG do tipo Casing API 5CT-N80Q, fabricados pelo processo ERW/HFIW longitudinal contínuo, em três etapas do processo de fabricação. Permitiu realizar a avaliação do nível de tensão residual existente no Tubo 1 na etapa de inspeção após o desempenho a quente e a abertura do CP-F. Foi importante ainda verificar o excelente nível de anisotropia neste tipo de tubo. A seguir são apresentadas as principais conclusões do presente trabalho:

1. Os tubos avaliados após a etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido mostraram uma redução na faixa de variação e, no valor de B (65,9% em média), em comparação aos valores obtidos com os tubos antes do tratamento;
2. Os valores de B nos cinco pontos de inspeção dos tubos após a etapa de desempenho a quente mostraram uma redução na faixa de variação e, no valor de B (36,5% em média), em comparação aos valores obtidos com os tubos antes da etapa de tratamento térmico de têmpera/revenido;
3. Os resultados obtidos na avaliação acustoelástica dos tubos 1, 2 e 3 após o desempenho mostraram que os valores das birrefringências acústicas no ponto 6H são muito próximos e podem ser considerados iguais;
4. Os tubos OCTG do tipo Casing inspecionados mostraram uma anisotropia menor que as encontradas em tubos do tipo Pipeline, avaliados em trabalhos realizados por outros pesquisadores;
5. A birrefringência acústica média obtida em um tubo aberto pode ser usada como a birrefringência acústica inicial ( $B_0$ ) para obter a tensão residual em um tubo (da mesma especificação) pela técnica ultrassônica de medida de tensão da birrefringência acústica;
6. Foi verificada uma diferença de 3% entre os valores de tensão residual obtidos pela técnica ultrassônica da birrefringência acústica (15%) e o do método da norma ASTM E1928 (12%) em relação ao limite de escoamento do material.

## **CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS**

### **FUTURAS**

1. Em função da oportunidade gerada pelo resultado obtido e pela excelente qualidade dos tubos OCTG em inspeção proponho a realização de um novo estudo envolvendo dez ou mais tubos do mesmo material e com as mesmas dimensões, produzidos na linha de fabricação OCTG da empresa APOLO TUBULARS S.A., no intuito de ser levantado um valor médio de  $B$  nos corpos-de-prova extraídos e cortados desses tubos como realizado com o CP-F-RA neste estudo ( $B_{CP-F-RA \text{ MÉDIO}}$ ). Se for provado que o  $B_{MÉDIO}$  obtido atende aos requisitos estatísticos selecionados na avaliação (desvio padrão, testes de hipótese nula, etc.), ele poderá ser usado como o valor da birrefringência inicial ( $B_0$ ) para os tubos OCTG do Tipo Casing API 5CT Grau N80Q, permitindo assim o uso da técnica ultrassônica da birrefringência acústica como ferramenta na determinação direta do valor da tensão residual existente em qualquer tubo com as mesmas características materiais e dimensionais. Obtido êxito neste novo estudo sugiro ainda que sejam realizados trabalhos similares visando fechar o ciclo de avaliação nos tubos API 5CT N80Q para as outras dimensões usadas na linha de fabricação de tubos OCTG. Em seguida a experiência poderá ser realizada nos outros tubos da linha API 5CT para levantamento de  $B_0$  e fechamento dos dados necessários para uso da técnica ultrassônica da birrefringência acústica na determinação do nível de tensão residual existente em tubos fabricados segundo a norma API 5CT.
2. Realizar um estudo semelhante à primeira proposta entre tubos OCTG API 5CT com as mesmas dimensões e com o limite de escoamento de 80 Ksi, porém sendo a metade dos tubos do Grau N80 (sem tratamento térmico de têmpera/revenido) e a outra metade do Grau N80Q (com tratamento térmico), buscando assim verificar se existe diferença no comportamento acustoelástico dos dois tipos.
3. Fazer um estudo com tubos API 5CT Grau N80 antes e após as etapas de tratamento térmico de têmpera/revenido e de desempenho a quente e que sejam extraídos corpos-de-prova obedecendo à norma ASTM E1928-07, para ser realizada uma avaliação acustoelástica nos pontos de inspeção da região em estudo, antes da extração dos corpos-de-prova e após a operação de corte

destes. Esse estudo permitirá avaliar o grau de tensão residual a que um tubo está sujeito nestas etapas de fabricação, e ainda comparar com o valor obtido segundo a metodologia dada pela norma.

4. Fazer um estudo acustoelástico também com o uso de corpos-de-prova extraídos dos tubos OCTG antes e após a etapa de desempenho a quente, variando os parâmetros da desempenadeira visando reduzir o nível de tensão residual inserido nesta etapa de fabricação sem implicar em perda de qualidade do tubo em relação ao grau de empeno.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] – NAGY, P.B., “Opportunities and challenges for nondestructive residual stress assessment”. In: THOMPSON, D.O.; CHIMENTI, D.E., **Review of quantitative nondestructive evaluation**. American Institute of Physics, Vol. 25, 2006. p.22-37.

[2] – PETROBRAS S.A.

Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/principais-subsidiarias>>

Acesso em 20/08/2011.

[3] – RIBEIRO, F.J.L., PEDROZA, A.C.P., COSTA, L.H.M.K.C., “Sistema de monitoramento subaquático usando navios de suporte logístico em uma rede de sensores acústicos tolerante a atrasos e interrupções”, **XXIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS**, Anais – p.133-146, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil, 2011.

[4] - APOLO TUBULARS S.A.

Disponível em: <<http://www.apolotubulars.com.br>>.

Acesso em: 28 out. 2010.

[5] – BITTENCOURT, M.S.Q., FONSECA, M.A.C., LAMY, C.A. *et al.* “Estudo acustoelástico de tubos API-5L-X70 com costura”, **RIO OIL & GAS 2006**, IBP 1791\_06, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

[6] – CARDOSO, B.R., **Avaliação da Acustoelasticidade em Tubos de Aço API 5L X 46 com e sem Costura Visando o Estudo do Estado de Tensões**. Dissertação de Mestrado, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

[7] – MAGINA, P. G. **Análise de tensões com ultrassom em tubos soldados**. Dissertação de Mestrado, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

[8] – BITTENCOURT, M. S. Q., FONSECA, M.A.C., OLIVEIRA, C.H.F., “Determinação da constante acustoelástica de tubos API-5L-X70”, **RIO OIL & GAS 2008**, IBP 1663\_08, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

[9] – ALERS, G. A.; MCCOLSKEY, J. D. Measurement of residual stress in bent pipelines In: THOMPSON, D.O.; CHIMENTI, D.E. **Review of quantitative nondestructive evaluation**. American Institute of Physics, v. 21, 2002. p.1681-1687.

[10] – MEDEIROS, R. C., BITTENCOURT, M. S. Q., LAMY, C. A. et al. “Avaliação por ultra-som das tensões impostas em tubo API X-65”, **RIO PIPELINE 2003 CONFERENCE & EXPOSITION**, IBP 452\_03, Rio de Janeiro, Brasil, 02-06 Jun. 2003.

[11] – PANETTA, P. D., ALERS, G. A. Characterization of plastically deformed steel utilizing ultrasonic velocity and attenuation measurements. In: Thompson, D. O, Chimenti, D. E. – **Review of progress in quantitative nondestructive evaluation**. American Institute of Physics, v. 20, 2001. p1494-1500.

[12] – JAMES, M. R., LU, J. “Introduction”. In: LU, J. **Handbook of measurement of residual stresses**. Society for Experimental Mechanics, Inc., Lilburn, The Fairmont Press Inc., Chapter 1, 1996.

[13] – MASUBUCHI, K., BLODGETT, O. W., MATSUI, S. et al. “Residual stress and distortion”. In: HESSE, T.D. **Welding Handbook**, v. 1, Chapter 7, 2001.

[14] – BITTENCOURT, M.S.Q., **Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido na onda ultra-sônica e análise do estado de tensões em materiais metálicos pela técnica da birrefringência acústica**. Tese de D.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

[15] – HBM DO BRASIL. **Tensão residual: medindo forças internas no material**. Disponível em: <<http://www.hbm.com/pt/menu/aplicacoes/analise-experimental-de-tensao/como-medir-tensao/tensao-residual/>>

Acesso em: 26 set. 2010.

[16] – SCHNEIDER, E., Ultrasonic birefringence effect – its application for materials characterizations. In: **Optics and lasers in engineering**, Elsevier Science Limited, v. 22, 1995. 305-323p.

[17] – RUUD, C.O., “A review of nondestructive methods for residual stress measurement”, **Journal of Metals**, July 1981. p35–40.

[18] – PUC-Rio, Certificação Digital nº 9916673/CA, Capítulo III. **Técnica do furo-cego para medição de tensões residuais.**

Disponível em: <[http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/4411/4411\\_4.PDFXXvmi=kJOffCCQRfsWeFGAa77mRWsm2tMdV8zhRox81aZTqrRG7zqiGnGzIzVn3JB0RbiJBRSD3RwtkoasXrLFPReb2bA5Ub6MnpwZhqCkjaPEA08xsTeimsuoE5uAhCmG2UFkliFGtvk4wsD0nRjKkOa0UFAdhXTjTAFgTkWnRhroL5oaWIUix6itLTH3RCnLc326oZtghWG425e0OaimgCR3vA6ncuaozdvXd1fuXVA12O2Q0lehX6kuGrTTW4jviPuv](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/4411/4411_4.PDFXXvmi=kJOffCCQRfsWeFGAa77mRWsm2tMdV8zhRox81aZTqrRG7zqiGnGzIzVn3JB0RbiJBRSD3RwtkoasXrLFPReb2bA5Ub6MnpwZhqCkjaPEA08xsTeimsuoE5uAhCmG2UFkliFGtvk4wsD0nRjKkOa0UFAdhXTjTAFgTkWnRhroL5oaWIUix6itLTH3RCnLc326oZtghWG425e0OaimgCR3vA6ncuaozdvXd1fuXVA12O2Q0lehX6kuGrTTW4jviPuv)>

Acesso em: 25 set. 2010.

[19] – GONÇALVES JÚNIOR, A.A.G., KANDA, C. “Sistema ótico aprimora medição de tensões residuais em dutos enterrados”, **Revista TN Petróleo**, Edição 71, 2010. p118–120.

Disponível em: <[www.tnpetroleo.com.br/download.php/.../TN71\\_Artigo\\_%3F\\_Dutos.pdf](http://www.tnpetroleo.com.br/download.php/.../TN71_Artigo_%3F_Dutos.pdf)>

Acesso em: 23 set. 2010.

[20] – LAMBDA TECHNOLOGIES. “Measurement of residual stresses using ring core technique”, **Diffraction Notes**, No. 31, Spring – 2005.

Disponível em: <<http://www.lambdatechs.com/html/resources/dn31.pdf>>

Acesso em: 11 set. 2010.

[21] – SCHNEIDER E., HÖLLER, P.; GOEBBELS, K. “Non-destructive detection and analysis of residual and loading stresses en thick-walled components”. **Nuclear Engineering and Design**, Amsterdam, n.84, p.165–170, 1985.

[22] – ANDREUCCI, R. **Apostila de Ensaio por Ultra-som.**, ABENDE, Ed. Set. 2006.

- [23] – FUKUOKA, H., Ultrasonic Measurement of Residual Stress. In: ACHENBACH, J.D., RAJAPKSE, Y. **Solid Mechanics Research for Quantitative Non-destructive Evaluation**. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987. p.275–299.
- [24] – HAUK, V., **Structural and residual stress analysis by non-destructive methods: evaluation, application, assessment**. Elsevier Science Limited, 1997.
- [25] – HUGHES, D.S., KELLY, J.K., **Second Order Elastic Deformation of Solids**. Physical Review, v. 92, n. 5, Dec. 1953. p.1145-1149.
- [26] – ORTEGA, L. P. C., LAMY, C. A., BITTENCOURT, “*et al*”. **Introdução à Avaliação de Tensões por Ultrassom**. 1ª ed. Rio de Janeiro, Virtual Científica, 2011.
- [27] – CARDOSO, B. R., FILHO, J. C. P., BITTENCOURT, M. S. Q. et al. “Estudo da acustoelasticidade de tubos sem costura usados no transporte de óleo e gás”, **RIO OIL & GAS 2006**, IBP 1789\_06, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- [28] – BITTENCOURT, M.S.Q., PAYÃO, J.C., LAMY, C.A., *et al*, “Medida de Tempo de Percurso da Onda Ultra-Sônica para Avaliação de Tensões”. In: **III Conferência Pan-Americana de Ensaio Não Destrutivos (PANNDT)**, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 02-06 Junho 2003.
- [29] – FREITAS, J.J. **Validação de uma metodologia de ensaio de resistência ao cisalhamento para avaliação da aderência de interfaces revestimento metálico-bainha de cimento aplicada a poços de petróleo**. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, 2007.  
Disponível em: < <http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/cp108498.pdf>>.  
Acesso em: 24 out. 2010.
- [30] – TELLES, P.C.S., **Tubulações industriais: materiais, projeto e desenho**. - Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Reimpressão 2008, 10ª Edição, 2001.
- [31] – TRINDADE, V.B. *et al*. **Produção de tubos de aço de grandes diâmetros soldados pelo processo arco submerso helicoidal (Espiral)**. In: Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 61, 2006.

Disponível em:  
<[http://www.abmbrasil.com.br/congresso/2006/sessoes\\_tecnicas\\_interna.asp?cd\\_tabela=39&tabela=oral](http://www.abmbrasil.com.br/congresso/2006/sessoes_tecnicas_interna.asp?cd_tabela=39&tabela=oral)>

Acesso em: 30 ago. 2010.

[32] – SILVA, R.C. **Caracterização de um aço microligado ao boro e tratado termicamente utilizado na fabricação de tubos.** Dissertação de Mestrado, UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil, 2009.

Disponível em:  
<[http://webcache.googleusercontent.com/u/unesp1?q=cache:b8Y20se568AJ:www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/beg/33004080027P6/2009/silva\\_rc\\_me\\_guara.pdf+Disserta%C3%A7%C3%A3o+-+Caracteriza%C3%A7%C3%A3o+de+a%C3%A7o&cd=4&hl=pt-BR&ct=clnk&ie=UTF-8](http://webcache.googleusercontent.com/u/unesp1?q=cache:b8Y20se568AJ:www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/beg/33004080027P6/2009/silva_rc_me_guara.pdf+Disserta%C3%A7%C3%A3o+-+Caracteriza%C3%A7%C3%A3o+de+a%C3%A7o&cd=4&hl=pt-BR&ct=clnk&ie=UTF-8)>

Acesso em: 30 out. 2010

[33] – VALLOUREC & SUMITOMO TUBOS DO BRASIL

Disponível em: <http://www.vstubos.com/pt/produtos/octg.php>

Acesso em: 26 jun. 2011

[34] - TENARIS CONFAB – Tratamento Térmico

Disponível em: <[http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/prodser/octg\\_termico.aspx](http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/prodser/octg_termico.aspx)>

Acesso em: 26 jun. 2011

[35] – V & M DO BRASIL – Catálogo de produtos OCTG – p.8/60 - Edição set. 2006

[36] – TENARIS CONFAB – Catálogo de Produtos e Serviços para Poços de Petróleo e Gás – p.5/16 - Versão 05 / set. 2008

[37] – Holmquist, J.L., Nadai, A., **A theoretical and experimental approach to the problem of collapse of deep-well casing.** Drilling and Production Practice – American Petroleum Institute, 1939.

[38] – MEHDIZADEH, P., **Casing Collapse Performance.** Continental Oil Company, Ponca City, Oklahoma, 1973/1974.

[39] – TENARIS CONFAB, **Tubos para condução e distribuição - Line Pipe**, 2010

Disponível em: <[http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/files/processo\\_ERW.pdf](http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/files/processo_ERW.pdf)>.  
Acesso em: 30 ago. 2010.

[40] – TENARIS CONFAB, **Tubos para condução e distribuição - Line Pipe**, 2010  
Disponível em: <[http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/files/processo\\_UOE.pdf](http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/files/processo_UOE.pdf)>.  
Acesso em: 30 ago 2010.

[41] – TENARIS CONFAB, **Tubos para condução e distribuição - Line Pipe**, 2010  
Disponível em: <[http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/files/processo\\_SAW.pdf](http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/files/processo_SAW.pdf)>.  
Acesso em: 30 ago. 2010.

[42] – TENARIS CONFAB  
Disponível em: <<http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt/default.aspx>>.  
Acesso em: 19 out. 2010.

[43] – TENARIS CONFAB  
Disponível em:  
<<http://www.tenaris.com/common/asp/search.aspx?q=conex%C3%B5es&p=0&v=15>>  
Acesso em: 17 out. 2010.

[44] – ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (2007), **Standard Practice for Estimating the Approximate Residual Circumferential Stress in Straight Thin-walled Tubing**. ASTM Testing Designation: E1928

[45] – Faires, V. M. – Virgil M. Faires, **Elementos Orgânicos de Máquinas**. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Reimpressão 1976, 2ª Edição, 1976.

[46] – Clapham, L., Krause, T.W., Olsen, H., *et al*, “Characterization of Texture and Residual Stress in a Section of 610 mm Pipeline Steel”, **NDT & E International**, v 28, n. 2, p.73-82, Apr. 1995.