

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

MARCO AURÉLIO MONTEIRO DUTRA

AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DO AÇO 20 MnMoNi 55, MATERIAL ESTRUTURAL  
DO VASO DE PRESSÃO DOS REATORES NUCLEARES DE ANGRA II E III

RIO DE JANEIRO

2009

MARCO AURÉLIO MONTEIRO DUTRA

**AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DO AÇO 20 MnMoNi 55, MATERIAL  
ESTRUTURAL DO VASO DE PRESSÃO DOS REATORES NUCLEARES DE ANGRA  
II E III**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear – Profissional em Engenharia de Reatores

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt

Rio de Janeiro

2009

AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DO AÇO 20 MnMoNi 55, MATERIAL ESTRUTURAL  
DO VASO DE PRESSÃO DOS REATORES NUCLEARES DE ANGRA II E III

Marco Aurélio Monteiro Dutra

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA  
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA NUCLEAR – PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE REATORES

Aprovada por:

---

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

---

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

---

Dr. Carlos Alfredo Lamy, D. Sc.

---

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

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2009

DUTR Dutra, Marco Aurélio Monteiro.

Avaliação acustoelástica do aço 20MnMoNi55, material estrutural do vaso de pressão dos reatores nucleares de Angra II e III / Marco Aurélio Monteiro Dutra – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2009.

xvi, 95 p. : il. ; 31 cm

Orientador: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) - Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2009.

1. Ultrassom. 2. Análise de tensões. 3. Aço 20MnMoNi55  
4. Estatística

CDD  
CDU

## **DEDICATÓRIA**

À memória do querido e amigo Eduardo Alberto Vieira Dutra, meu pai, que com sabedoria e dedicação incentivou os meus estudos, mostrando a importância do saber e plantou uma semente de caráter, honestidade, justiça, amor e respeito ao próximo em seus filhos.

À minha filha Maria Eduarda e ao meu sobrinho Bruno, os quais amo muito e são minha inspiração.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Dr. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, pela orientação, pelo incentivo, motivação, paciência e compreensão, mas também pelas valiosas sugestões e discussões, além da sua amizade e respeito.

Ao Dr. Carlos Alfredo Lamy pela motivação e esclarecimentos durante este trabalho.

Aos professores do PPGIEN, que contribuíram muito para o meu desenvolvimento profissional.

A todos os colegas do SUMET/IEN, em especial ao Engenheiro Manoel Antônio da Costa Fonseca e aos técnicos Antônio Geraldo, Paulo Ribeiro Ramos, Daniel Martorelli pela compreensão, boa vontade e presteza sem reservas para comigo em todos os momentos que necessitei do apoio desta equipe nas diversas etapas deste trabalho.

Ao meu amigo José Luiz Mantovano do SEAQE/IEN, pela especial ajuda e orientação na análise química do aço 20 MnMoNi 55.

Ao CETEC SOLDA, em especial ao Engenheiro Mário Bittencourt Quirino de Almeida e aos técnicos Edemir e Maurício pela realização da usinagem inicial da barra de aço 20 MnMoNi 55 para confecção dos corpos de prova.

Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), em especial ao Engenheiro Francisco Bóssio, pela conclusão do trabalho de usinagem dos corpos-de-prova.

À equipe da oficina do Instituto de Engenharia Nuclear, em especial ao colega Dagoberto Carneiro, pelo trabalho de usinagem e acabamento final dos corpos-de-prova.

Ao amigo Douglas Brandão Baroni, pela ajuda e esclarecimentos durante toda a realização deste trabalho, e aos amigos de mestrado: Rafael, Stefan, Carlos, Altivo e André, pelo apoio e companheirismo durante todo o curso.

Aos colegas do Serviço de Reatores (SEREA/IEN), pela amizade e compreensão em todos os momentos, em especial ao amigo Francisco José de Oliveira Ferreira, pela paciência e incentivo durante toda a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Virgínia Monteiro Vieira Dutra e Eduardo Alberto Vieira Dutra (in memoriam), e à minha irmã Ana Cristina e meu cunhado Carlos Augusto, que me apoiaram em todos os momentos da minha vida e mesmo a distância durante toda a realização deste trabalho.

À minha esposa Aline Marques da Fonseca, que com compreensão e paciência me apoiou para que eu realizasse este trabalho.

Minha estimada gratidão a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, pela oportunidade de chegar até aqui superando todos os imprevistos e momentos difíceis.

Resumo da dissertação apresentada ao PPGIEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em ciências (M. Sc)

## AVALIAÇÃO ACUSTOELÁSTICA DO AÇO 20 MnMoNi 55, MATERIAL ESTRUTURAL DO VASO DE PRESSÃO DOS REATORES NUCLEARES DE ANGRA II E III

Marco Aurélio Monteiro Dutra

Junho/2009

Orientador: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt

Programa: Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do IEN

Os vasos de pressão das usinas nucleares Angra II e III, que são de grandes espessuras, têm como um dos seus componentes estruturais o aço 20 MnMoNi 55. A avaliação acustoelástica realizada através de ensaios ultrassônicos foi baseada na variação de velocidade da onda ultrassônica cisalhante de incidência normal em função da tensão aplicada no material, utilizando-se a técnica de birrefringência acústica, que é fundamentada na diferença fracional da velocidade da onda ultrassônica em relação à duas direções perpendiculares. Neste trabalho foram realizadas duas experiências. Na primeira, foi avaliado para esta técnica de análise de tensão um novo método de aquisição de sinais ultrassônicos que foi comparado com o método usual, pretendendo determinar suas potencialidades e limites para a aplicação em materiais com até 120 mm de espessura. Na segunda, foi realizado o estudo do comportamento acustoelástico do aço 20 MnMoNi 55. O novo método de aquisição de sinais ultrassônicos apresentou resultados satisfatórios e foi utilizado no estudo acustoelástico do aço 20 MnMoNi 55. A análise acustoelástica indicou que o material apresenta um comportamento anisotrópico e heterogêneo. A constante acustoelástica do material, obtida experimentalmente através de ensaios de compressão realizados em corpos-de-prova do aço 20 MnMoNi 55, foi utilizada para a análise de tensão de forma quantitativa. Um corpo-de-prova do aço 20 MnMoNi 55 foi submetido a um ensaio de flexão para realizar a análise de tensão de forma qualitativa através da diferença entre as birrefringências obtidas durante o carregamento ( $B$ ) e antes do carregamento ( $B_0$ ), em cada ponto estudado. Com os resultados obtidos foi possível identificar qualitativamente e quantitativamente as regiões compressivas e trativas. A realização destes ensaios permitiu verificar a eficiência da técnica ultrassônica de birrefringência acústica para analisar o estado de tensões.

Palavras-chave: Birrefringência acústica, anisotropia, aço 20 MnMnNi 55.

Abstract off dissertation presented to PPGIEN/CNEN as a partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science (M.Sc)

## ACOUSTOELASTIC EVALUATION OF THE 20 MnMoNi 55 STEEL, STRUCTURAL MATERIAL OF THE PRESSURE VESSELS OF ANGRA II AND III NUCLEAR REACTORS

Marco Aurélio Monteiro Dutra

June/2009

Advisor: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt

Departament: Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do IEN

The pressure vessels of the Angra II and Angra III nuclear power plants, which are of large thickness, have as one of their structural components the 20 MnMoNi 55 steel. The acoustoelastic evaluation carried out through non-destructive ultrasonic tests was based on the variation of the speed of ultrasonic shear waves of normal incidence as a function of the stress applied in the material using the acoustic birefringence technique, which considers the fractional difference of the speeds of two ultrasonic waves propagating in orthogonal directions. In this work two experiments were carried out. In the first one, a new method for acquisition of ultrasonic signals for joint application with this technique of stress analysis was evaluated by comparison with the conventional one. The aim was to determine its potential and limitations for application in materials up to 120 mm of thickness. In the second experiment, the acoustoelastic behavior of the 20 MnMoNi 55 steel was studied. The new method of acquiring ultrasonic signals led to satisfactory results and was used in the study of the acoustoelastic behavior of the 20 MnMoNi 55 steel. The acoustoelastic analysis indicated that the material has an anisotropic and heterogeneous behavior. The acoustoelastic constant of this material, obtained experimentally from the analysis of the graphs of the material behavior (birefringence x stress) under compression tests performed on specimens of the 20 MnMoNi 55 steel, was used for the quantitative stress analysis. A specimen of the 20 MnMoNi 55 steel was subjected to a bending test to carry out a qualitative stress analysis through the difference between the values of the birefringence obtained during loading (B) and before loading ( $B_0$ ) in every point studied. With the obtained results it was possible to identify qualitative and quantitatively the regions of the specimen under compressive and tensile stresses. The execution of these tests allowed to verify the efficiency of the ultrasonic technique of the acoustic birefringence for the analysis of stress states.

Keywords: Acoustic birefringence, anisotropy, 20 MnMoNi 55 steel.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Movimento da onda transversal – Fonte [4]	09
Figura 2.2 – Espectro de frequências sonoras – Fonte[4]	10
Figura 2.3 – Comportamento do cristal piezoelétrico – Fonte [4]	13
Figura 2.4 – Transdutor normal – Fonte [4]	14
Figura 2.5 – Tensões residuais macroscópicas - Fonte [7]	18
Figura 2.6 – Tensões residuais tipo II – Fonte [7]	18
Figura 2.7 – Tensões residuais tipo III – Fonte [7]	19
Figura 3.1 – Regiões marcadas na direção circunferencial do tubo	29
Figura 3.2 – Diagrama esquemático do sistema ultrassônico	30
Figura 3.3 – Fotos do sistema ultrassônico montado para este trabalho, do programa “Wave Star”, detalhe do corpo-de-prova em estudo com o transdutor acoplado e o termopar e o alinhamento do transdutor longitudinalmente e transversalmente a peça	31
Figura 3.4 – Peça da liga de aço 20 MnMoNi 55 e suas dimensões	35
Figura 3.5 - Imagem da microestrutura- 1ª amostra	39
Figura 3.6 - Imagem da microestrutura- 2ª amostra	39
Figura 3.7 – Diagrama esquemático do sistema ultrassônico	40
Figura 3.8 – Fotos da superfície pronta da peça para o ensaio ultrassônico	43
Figura 3.9 – Distribuição e dimensionamento dos pontos para aquisição de dados – 320 pontos (dimensões em mm)	44
Figura 3.10 – Visualização da tela do programa “Chronos” no microcomputador	46

Figura 3.11 – Dimensões das barras “A”, “B” e “C” (dimensões em mm)	47
Figura 3.12 – Dimensões das barras “D” e “E” (dimensões em mm)	47
Figura 3.13 – Dimensões da barra “F” (dimensões em mm)	48
Figura 3.14 – Dimensões das barras “C” e “G” (dimensões em mm)	48
Figura 3.15 – Fotos do ensaio de compressão	51
Figura 3.16 – Exemplo de ensaio de flexão	52
Figura 3.17 – Disposição dos pontos analisados no corpo-de-prova para o ensaio de flexão. A distância entre os pontos é de 17,5 mm	54
Figura 4.1 – Gráfico das médias longitudinais e transversais nos 6 dias	57
Figura 4.2 – Gráfico com o comportamento das birrefringências e suas médias diárias	57
Figura 4.3 – Tempos (longitudinal) x temperaturas	59
Figura 4.4 – Tempos (transversal) x temperaturas	59
Figura 4.5 – Distribuição e dimensionamento dos pontos para aquisição de dados – 80 pontos (dimensões em mm)	66
Figura 4.6 – Gráfico de distribuição das birrefringências ao longo da peça	73
Figura 4.7 – Visualização da tela do programa de análise de dados que permite realizar o teste Anova: fator único	78
Figura 4.8 – Gráfico de obtenção da constante acustoelástica – 1º ensaio	80
Figura 4.9 – Gráfico de obtenção da constante acustoelástica – 2º ensaio	81
Figura 4.10 – Gráfico da tensão x tempo – 1º ensaio (carregamento na direção de 40 mm do C.P.)	81

Figura 4.11 – Gráfico da tensão x tempo – 2º ensaio (carregamento na direção de 60 mm do C.P.)	82
Figura 4.12 – Comparação entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento de 28.000 kg	86
Figura 4.13 – Comparação entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento de 42.000 kg	86
Figura 4.14 – Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento de 28.000 kg	87
Figura 4.15 - Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento de 42.000 kg	88
Figura 4.16 – Fotos do ensaio de flexão	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Velocidade de propagação das ondas transversais em diversos materiais – Fonte [4]	11
Tabela 2.2 – Impedância acústica de alguns materiais e acoplantes – Fonte [4]	15
Tabela 2.3 – Principais fontes e sub-fontes de tensões residuais – Fonte [7]	17
Tabela 2.4 – Vantagens e desvantagens dos métodos para medição de tensões residuais – Fonte [6]	21
Tabela 3.1– Composição química do aço 20 MnMoNi 55 utilizado nas usinas nucleares da Alemanha. Fonte: [17]	36
Tabela 3.2 - Valores do resultado da análise química.	37
Tabela 4.1 – Dados obtidos nos 6 dias de ensaios da 1ª etapa	56
Tabela 4.2 – Valores das médias das birrefringências nos 6 dias	57
Tabela 4.3 – Dados obtidos nos 2 dias de ensaios da 2ª etapa	58
Tabela 4.4 – Dados obtidos através da aquisição dos tempos longitudinais e transversais na peça do 20 MnMoNi 55	63
Tabela 4.5 – Comparação das médias dos tempos com 10 sinais e 50 sinais	65
Tabela 4.6 – Médias dos tempos longitudinais nos 80 pontos	67
Tabela 4.7 – Médias dos tempos transversais nos 80 pontos	68
Tabela 4.8 – Diferenças entre as médias dos tempos long. e transv. no mesmo ponto (ns)	69

Tabela 4.9 – Diferença entre o maior e o menor tempo entre os 10 sinais long. num mesmo ponto (ns)	70
Tabela 4.10 – Diferença entre o maior e o menor tempo entre os 10 sinais transv. num mesmo ponto (ns)	71
Tabela 4.11 – Médias das birrefringências nos 80 pontos	72
Tabela 4.12 – Valores das médias das birrefringências nos 80 pontos, com a média e desvio padrão	77
Tabela 4.13 – Resultado obtido utilizando-se o programa de dados do Microsoft Excel – Anova: fator único	79
Tabela 4.14 - Tempos e birrefringências – ensaio de flexão (sem carregamento)	83
Tabela 4.15 – Tempos e birrefringências – ensaio de flexão (carregamento de 28.000 kg)	84
Tabela 4.16 – Tempos e birrefringências – ensaio de flexão (carregamento de 42.000 kg)	85
Tabela 4.17 – Valores das tensões nos 5 pontos em cada carregamento	89

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A – Constante acustoelástica;
- CP – Corpo de prova;
- B – Birrefringência acústica final;
- $B_0$  – Birrefringência acústica inicial;
- P – Grau de confiança;
- $\alpha$  - Grau de incerteza;
- $H_0$  – Hipótese nula;
- $H_1$  – Hipótese alternativa;
- $\varnothing_{ext}$  – Diâmetro externo;
- $\beta$  - Erro tipo II, na hipótese nula;
- G - Módulo de rigidez ( $\text{kg/ms}^2$ );
- $\rho$  - Massa específica ( $\text{kg/m}^3$ );
- V – Velocidade (m/s);
- F – Freqüência (Hz);
- Z – Impedância acústica;
- $\lambda$  - Comprimento de onda;
- $\lambda, \mu$ - Constantes de Lamé;
- l, m, n – Constantes de 3ª ordem ou de Murnaghan;
- ns- nanosegundos
- PWR – Reator à água pressurizada;
- ASTM – American Society for testing and Materials (órgão americano de normatização de vários materiais, produtos, sistemas e serviços)
- NUCLEP – Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A.

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	OBJETIVO DA PESQUISA	1
1.3	ESCOPO DA PESQUISA	2

### CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

<b>2.1</b>	<b>LIGA DE AÇO DIN 20MnMoNi 55</b>	<b>3</b>
2.1.1	CARACTERÍSTICAS	3
2.1.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO DIN 20 MnMoNi 55	4
2.1.3	MICROESTRUTURAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS	7
<b>2.2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO ENSAIO POR ULTRASSOM</b>	<b>8</b>
2.2.1	PROPAGAÇÃO DAS ONDAS	8
2.2.1.1	ONDAS TRANSVERSAIS (ONDAS CISALHANTES)	9
2.2.2	FREQUÊNCIA, VELOCIDADE E COMPRIMENTOS DE ONDA	10
2.2.2.1	FREQUÊNCIA	10
2.2.2.2	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO	11
2.2.2.3	COMPRIMENTO DE ONDA	11
2.2.2.4	RELAÇÕES ENTRE VELOCIDADE, COMPRIMENTO DE ONDA E FREQUÊNCIA	12

2.2.3	GERAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS	12
2.2.3.1	EFEITO PIEZELÉTRICO	12
2.2.3.2	TRANSDUTORES NORMAIS	13
2.2.3.3	ACOPLAMENTO	14
2.2.4	TÉCNICA DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM PULSO-ECO	15
2.2.5	APARELHAGEM DO ENSAIO DE ULTRASSOM	16
<b>2.3</b>	<b>TENSÕES RESIDUAIS</b>	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS</b>	<b>20</b>
<b>2.5</b>	<b>TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DE TENSÃO POR ULTRASSOM</b>	<b>22</b>
<b>2.6</b>	<b>ACUSTOELASTICIDADE E BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA</b>	<b>24</b>

### **CAPÍTULO 3 - METODOLOGIAS, PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E OS ENSAIOS REALIZADOS**

<b>3.1</b>	<b>PRIMEIRA EXPERIÊNCIA - AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS</b>	<b>28</b>
3.1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
3.1.2	MATERIAL DE ESTUDO	28
3.1.3	ARRANJO EXPERIMENTAL	29
3.1.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.1.5	METODOLOGIAS	33
3.1.5.1	PRIMEIRA ETAPA - SOBRE AQUISIÇÃO DE SINAIS	33
3.1.5.2	SEGUNDA ETAPA – SOBRE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	34

<b>3.2 SEGUNDA EXPERIÊNCIA – ESTUDO ACUSTOELÁSTICO DO AÇO 20</b>	
<b>MnMoNi 55, ATRAVÉS DA METODOLOGIA SELECIONADA</b>	<b>35</b>
3.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	35
3.2.2 MATERIAL DE ESTUDO	35
3.2.3 ANÁLISE QUÍMICA	36
3.2.4 ENSAIO METALOGRÁFICO	38
3.2.5 ARRANJO EXPERIMENTAL	40
3.2.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
3.2.7 METODOLOGIA	43
3.2.8 USINAGEM DA PEÇA DE AÇO 20 MnMoNi 55	46
3.2.9 OBTENÇÃO DA CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA	49
3.2.9.1 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO	50
3.2.10 ENSAIO DE FLEXÃO	51
3.2.10.1 CÁLCULO DA TENSÃO EM FLEXÃO	51
3.2.10.2 METODOLOGIA DO ENSAIO DE FLEXÃO	53
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS, AS</b>	
<b>ANÁLISES E INTERPRETAÇÕES PERTINENTES</b>	
<b>4.1 PRIMEIRA EXPERIÊNCIA - AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE</b>	
<b>AQUISIÇÃO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS</b>	<b>56</b>
4.1.1 RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA ETAPA – SOBRE	
AQUISIÇÃO DE SINAIS	56

4.1.2 RESULTADOS OBTIDOS NA SEGUNDA ETAPA – SOBRE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	58
4.1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA	60
4.1.3.1 PRIMEIRA ETAPA – SOBRE AQUISIÇÃO DE SINAIS	60
4.1.3.2 SEGUNDA ETAPA – SOBRE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	61
<b>4.2 SEGUNDA EXPERIÊNCIA – ESTUDO ACUSTOELÁSTICO DO AÇO 20 MnMoNi 55, ATRAVÉS DA METODOLOGIA SELECIONADA</b>	<b>63</b>
4.2.1 ANÁLISE DOS TEMPOS DE PERCURSO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS CISALHANTES NA PEÇA DO AÇO 20 MnMoNi 55	64
4.2.2 LEVANTAMENTO DAS BIRREFRINGÊNCIAS ACÚSTICAS NA PEÇA DE AÇO 20 MnMoNi 55	65
4.2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS BIRREFRINGÊNCIAS ACÚSTICAS	73
4.2.4 RESULTADOS E ANÁLISES DAS CONSTANTES ACUSTOELÁSTICAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO	80
4.2.5 RESULTADOS E ANÁLISES DOS TEMPOS E BIRREFRINGÊNCIAS ACÚSTICAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE FLEXÃO	82
4.2.5.1 COMPARAÇÃO DAS BIRREFRINGÊNCIAS ACÚSTICAS OBTIDAS ANTES E DURANTE O ENSAIO DE FLEXÃO	86
4.2.5.2 VALORES DAS TENSÕES OBTIDAS PELA TÉCNICA DA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA	88

## **CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES**

<b>5.1 – CONCLUSÕES</b>	<b>91</b>
RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O conhecimento do estado de tensões em estruturas e componentes industriais é da maior importância por questões econômicas e, principalmente, de segurança. Na área nuclear, a segurança operacional de suas instalações é uma preocupação permanente devido às conseqüências potenciais de um acidente com vazamento de material radioativo. O desenvolvimento de técnicas experimentais de medidas de tensão que visam minimizar os riscos de acidentes causados por falhas em tubulações, componentes estruturais em centrais nucleares é uma prioridade na área de integridade estrutural.

A liga de aço 20 MnMoNi 55 é usada como componente estrutural dos vasos de pressão das usinas nucleares de Angra II e III, onde estão localizados os elementos combustíveis, sendo considerada como a segunda barreira física que tem a função de impedir o vazamento de material radioativo para o meio ambiente. Este material é propício para esta finalidade, por possuir características adequadas para trabalhar às elevadas temperaturas e à ação da fissão nuclear pelo baixo dano causado pela intensa radiação, situações essas que ocorrem no núcleo dos reatores das usinas nucleares.

### **1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Este trabalho, através de duas experiências, tem por objetivo verificar a possibilidade de aplicação da técnica ultrassônica de birrefringência acústica na análise de tensões utilizando uma nova metodologia de aquisição dos sinais ultrassônicos para estudar o comportamento acustoelástico da liga de aço 20 MnMoNi 55.

No Laboratório de Ultrassom do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), foram realizados todos os ensaios ultrassônicos pertinentes às duas experiências.

Na primeira experiência foi avaliado um novo método de medidas de tempo de percurso da onda ultrassônica através de ensaios comparativos com o método de aquisição de sinais ultrassônicos já conhecido, além de avaliar a influência da variação de temperatura nas medidas de tempo da onda ultrassônica durante um

ensaio de ultrassom. O corpo de prova utilizado, devido às características e dimensões, foi uma tira removida de um tubo de aço API 5L X46 (com costura), utilizado no transporte de óleo e gás, já estudado anteriormente em trabalho deste Laboratório realizado junto à Petrobrás.

Na segunda experiência foram realizados ensaios ultrassônicos em uma peça de aço 20 MnMoNi 55 fornecida pela NUCLEP - Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A.. Esta peça foi submetida à uma preparação da superfície para se realizar os ensaios ultrassônicos de avaliação do comportamento acustoelástico, verificando a sua anisotropia acústica em função das tensões residuais, determinando a sua constante acustoelástica e a direção cristalográfica preferencial. Foi necessário o uso de uma ferramenta estatística para a interpretação dos resultados das birrefringências acústicas. Posteriormente, o material sofreu as usinagens necessárias para a obtenção dos corpos de prova para os respectivos ensaios.

Foi confirmado por análise química do material em estudo, a presença e os percentuais dos principais componentes químicos.

O ensaio metalográfico foi utilizado para analisar a sua caracterização microestrutural.

O ensaio de compressão foi realizado para se obter a constante acustoelástica do material, que será utilizada nos cálculos teóricos.

E, por último, o ensaio de flexão que foi executado para verificar a eficiência da técnica ultrassônica de birrefringência acústica para analisar o estado de tensões no corpo-de-prova. Através das tensões aplicadas, buscou-se identificar as tensões tratativas e compressivas, comparando os valores das tensões calculadas na teoria com os valores das tensões obtidas experimentalmente.

### **1.3 ESCOPO DA PESQUISA**

Esta dissertação esta organizada em 5 capítulos. Iniciando a descrição pelas considerações iniciais e os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a teoria e os conceitos das técnicas utilizadas.

O capítulo 3 apresenta as metodologias utilizadas, sendo apresentados os procedimentos experimentais e os ensaios realizados nas duas experiências.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados, e as análises e interpretações pertinentes nas duas experiências.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido, assim como algumas propostas e recomendações para pesquisas futuras.

## ***CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

### **2.1 LIGA DE AÇO 20MnMoNi55**

#### **2.1.1 CARACTERÍSTICAS**

O aço 20 MnMoNi 55 forjado (ASTM A508 CL3) é, atualmente, o aço mais empregado na fabricação de partes estruturais dos componentes primários de centrais nucleares de potência à água pressurizada (PWR), incluindo as centrais brasileiras, Angra II e Angra III. Um vaso de pressão de um reator nuclear possui grandes dimensões, inclusive nas suas espessuras, por isso, é necessária a utilização de processos especiais de fabricação para que sejam garantidas as características e propriedades em todo o equipamento.

A especificação é a mesma para o aço tipo laminado e forjado. As características desejáveis de resistência mecânica, fluência, tenacidade e soldabilidade são obtidas e influenciadas em função dos limites dos teores dos elementos de liga no aço 20 MnMoNi 55. Por isso, é necessário o controle de vários elementos químicos, pois este controle define o uso do aço para fins nucleares ou para fins convencionais [1].

Este aço possui 0,2% de carbono com 1,25% Mn, 0,5% Mo, 0,6% Ni com pequenas quantidades de Cr, Si e enxofre. Do ponto de vista metalúrgico, aumentar a resistência dos materiais podem ter influência sobre as outras propriedades, como dureza, resistência à corrosão, e podem também afetar a soldabilidade. Então, boas propriedades mecânicas e metalúrgicas são obrigatórias para suportar a

pressão interna e impedir um inesperado fracasso. Este material foi objeto de um vasto trabalho de investigação [1].

As peças são tratadas termicamente através de processos de normalização (870 a 925°C), têmpera em água e revenido (640° a 650°C), buscando sempre o alívio de tensões nas diversas etapas de fabricação do componente, evitando situações como fragilização e o aparecimento de trincas no material [1].

A realização de ensaios não-destrutivos nas peças como, por exemplo, ensaios de ultrassom e ensaios destrutivos realizados em amostras retiradas das peças são necessários para simular todos os ciclos de alívio de tensões durante o processo de fabricação para verificar o comportamento do material e o efeito nas suas propriedades mecânicas.

### **2.1.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO 20 MnMoNi 55**

No caso específico de componentes sujeitos à irradiação, os teores de Cu e P estão relacionados com a fragilização por irradiação de nêutrons. Os teores de Co e Ta têm importância adicional por terem isótopos de meia vida longa, que podem causar problemas de radioproteção, especialmente no descomissionamento do reator [1].

Cada elemento químico constituinte do Aço 20 MnMoNi 55 influencia nas propriedades do material, da seguinte maneira:

- a) O Mn, com teor em torno de 1,25% evita a fragilização a quente, devido a precipitação do FeS nos contornos de grão, pela formação preferencial e MnS, que, tendo uma temperatura de fusão mais elevada, se distribui no interior do grão [2];
- b) O Ni na faixa de 0,45 a 0,85% é benéfico, porque aumenta a tenacidade e a ductilidade, inclusive a ductilidade a quente, enquanto promove aumento na resistência mecânica e dureza;
- c) O Mo promove a formação de bainita, responsável pela elevação da temperatura de crescimento de grãos na região austenítica, melhorando a resistência e a dureza a quente [2];

- d) O teor de C entre 0,15 e 0,25% garante boa soldabilidade e a obtenção das propriedades mecânicas especificadas [3];
- e) Outros elementos formadores de carbonetos, tais como: Cr, Ti, Zr, Nb e V, devem ter seus teores limitados ao mínimo possível, já que não têm nenhuma função específica no aço 20 MnMoNi 55 [1].

As conseqüências da presença do grupo IVA e VA da tabela periódica, tais como: Sn, Sb, As e P, no aço 20 MnMoNi 55 foram estudadas por pesquisadores [2]. Estes elementos apresentam forte tendência à segregação dos contornos de grãos ferríticos e, com exceção do P, baixa tendência à segregação para contornos de grão austeníticos, causando, assim, redução na ductilidade à fluência e, como conseqüência, aumento na suscetibilidade à fragilização por reaquecimento e ao envelhecimento a quente na região de grãos grosseiros da zona termicamente afetada pela operação de soldagem.

O Al na presença do N forma fina dispersão de AlN (Nitreto de Alumínio) que reduz o crescimento de grão austenítico pelo processo de nucleação heterogênea. No aço 20 MnMoNi 55, o AlN é o principal responsável pela obtenção de granulação fina nas peças de grandes dimensões, já que estes requerem um longo tempo de austenitização para obterem um aquecimento uniforme. O teor de Al especificado é de 0,010 a 0,040% [3].

O S e O influem diretamente no volume e morfologia das inclusões não metálicas, que provocam alterações nas propriedades mecânicas. Teores de S de 0,01% proporcionam um patamar superior de energia na curva (energia absorvida x temperatura) no ensaio de impacto ISO-V. [3]

O Si forma inclusões (silicatos de Al e Mn) que proporcionam uma certa perda de tenacidade na direção da espessura, mas é benéfico no sentido de aumentar moderadamente a resistência mecânica sem riscos quanto à soldabilidade, dentro do teor especificado (0,10% a 0,35%). [3]

Quando líquido, o aço dissolve homogeneamente quase todo tipo de impurezas.

Ao solidificar, estas impurezas ficam insolúveis e tendem a segregar, diferenciando-se no meio do metal.

Ao acúmulo de impurezas nos lingotes e em certas peças fundidas dá-se o nome de "segregação".

Como a solidificação começa da periferia para o centro, é nesta última região que a maior parte das impurezas irão se acumular.

O P que se dirige para o centro atua no sentido de baixar o ponto de solidificação do metal, assim contribuindo também para que a região central se solidifique mais tarde.

Principalmente o P e o S são de pouca solubilidade no aço sólido, segregando-se à medida que a temperatura diminui.

A tendência é de se agrupar nas regiões solidificadas por último. Isto é normal nas zonas próximas aos vazios.

Estas segregações causam uma variação nas propriedades mecânicas nas regiões onde ocorrem.

Por isso, são estabelecidos teores máximos para cada elemento com vistas a não causar problemas nas propriedades dos metais.

Para se avaliar a presença de segregação podem ser feitas análises químicas ou metalográficas.

Quanto maior o tamanho da peça, mais intensa pode ser a segregação devido a menor velocidade de solidificação, pois há mais tempo para que as impurezas se segreguem.

Felizmente, a zona segregada fica em geral nas proximidades do centro das peças ou dos perfilados, onde as tensões são freqüentemente mais baixas, contribuindo para atenuar a sua nocividade. Isso explica o comportamento relativamente satisfatório em muitos casos.

De qualquer forma, deve-se exercer um controle, principalmente em peças submetidas a choques ou carregamentos alternados, pois a segregação pode contribuir na nucleação de trincas.

### 2.1.3 MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS

Muitos estudos têm sido publicados a respeito da microestrutura do aço 20 MnMoNi 55 e, ainda assim, existe uma certa divergência nas análises microestruturais apresentadas nestes estudos. As razões dessas divergências são causadas pelas variações das espessuras das peças em análise e a variação na composição química das mesmas.

As propriedades mecânicas e a microestrutura dependem, fundamentalmente, da taxa de resfriamento na têmpera seguida pelo revenido. A diferença da taxa de resfriamento ao longo de uma espessura de uma estrutura de grandes dimensões provoca uma variação nas propriedades mecânicas do material.

Os microconstituintes são formados a partir de grãos austeníticos finos. A presença de martensita, ferrita, perlita, bainita superior e inferior, dependem da variação dos teores de alguns elementos químicos, como o Cr, Mo, Mn e da taxa de resfriamento, que varia de acordo com a espessura de cada peça. Isto é que define a resposta destas microestruturas às solicitações mecânicas [1].

A ferrita é ferro no estado alotrópico alfa, contendo em solução traços de carbono; apresenta também uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui baixa dureza e baixa resistência à tração, cerca de 28 Kgf/mm<sup>2</sup> (270 MPa), mas excelente resistência ao choque e elevado alongamento [1].

A perlita é a mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, na forma de lâminas finas (de espessura raramente superior a um milésimo de milímetro) dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas da perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e da cementita, dependendo, entretanto, do tamanho das partículas de cementita. Sua resistência à tração é, em média, 75 Kgf/mm<sup>2</sup> (740 MPa). A proporção de perlita num aço cresce de 0% para ferro até 100% para aço eutetóide (0,77% de carbono), de modo que um aço com 0,5% de carbono, por exemplo, apresentará em torno de 65% de perlita.

A martensita apresenta um reticulado tetragonal e sua dureza é muito elevada, podendo atingir 65 a 67 Rockwell C. Sua resistividade térmica é consideravelmente

mais alta que a dos conglomerados ferrita-cementita, qualquer que seja o seu grau de dispersão. Sua elevada dureza é devido a diversos fatores, tais como:

- precipitação de partículas submicroscópicas de carboneto de ferro da solução sólida gama e retenção dessas partículas na forma de uma solução sólida supersaturada no reticulado do ferro alfa (formado no esfriamento) onde atuam como espécies de “chavetas”, impedindo o escorregamento;
- distorção do reticulado;
- tensões internas;
- tamanho de grão muito pequeno.

A bainita é formada na temperatura entre 200 e 550°C, varia de aspecto, que vai desde um agregado de ferrita em forma de pena e carboneto de ferro muito fino, em torno de 450°C, até um constituinte em forma de agulhas com coloração escura, em torno de 200°C. Na parte mais baixa do diagrama TTT, a bainita caracteriza-se pela excelente ductilidade e resistência ao choque.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO ENSAIO POR ULTRASSOM**

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo, no qual um feixe sônico de alta frequência (maior que 20.000 Hz) é aplicado no material a ser inspecionado, neste caso, com o objetivo de verificar a anisotropia acústica do material através variação da velocidade de propagação da onda ultrassônica cisalhante de incidência normal à espessura (transversal à superfície) quando esta atravessa um material tensionado.

### **2.2.1 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS**

O ensaio ultrassônico de materiais é feito com o uso de ondas mecânicas colocadas no meio em inspeção, ao contrário da técnica radiográfica, que usa ondas eletromagnéticas, ou nêutrons. Qualquer onda mecânica é composta de oscilações de partícula no meio em que se propaga. Se assumirmos que o meio em

estudo é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção, podemos afirmar que a passagem de energia acústica no meio faz com que as partículas que compõem o mesmo, execute o movimento de oscilação em torno na posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuído com o tempo em decorrência da perda de energia adquirida pela onda.

### 2.2.1.1 ONDAS TRANSVERSAIS (ONDAS CISALHANTES)

Uma onda transversal é definida, quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação. As ondas transversais são geradas quando as partículas próximas à superfície são acionadas na direção paralela à esta superfície. Quando o primeiro plano se desloca, ele arrasta, pela interação elástica, o plano adjacente, e assim por diante, criando vales e cristas nos pontos laterais, conforme apresentado na Figura 2.1. Neste caso, os planos de partículas continuam eqüidistantes, movimentando-se lateralmente com ação cisalhante entre eles. O comprimento de onda é a distância entre dois “vales” ou dois “picos”.

A velocidade das ondas cisalhantes é de aproximadamente 50 % da velocidade da onda longitudinal no mesmo meio.

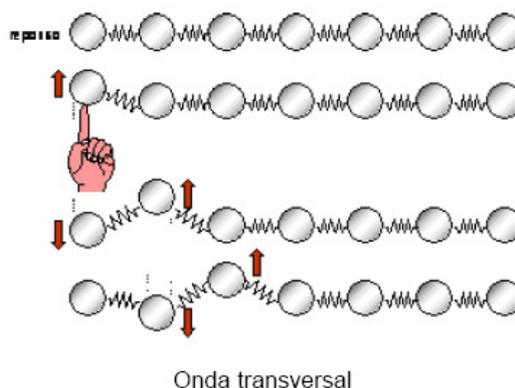


Figura 2.1 - Movimento da onda transversal – Fonte [4].

As partículas oscilam na direção transversal a direção de propagação, podendo ser transmitidas somente à sólidos. As ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem nos líquidos e gases, pelas características das ligações entre partículas, destes meios. O comprimento de onda é a distância entre dois “vales” ou dois “picos”.

A velocidade das ondas cisalhantes é de aproximadamente 50 % da velocidade da onda longitudinal no mesmo meio.

## 2.2.2 FREQUÊNCIA, VELOCIDADE E COMPRIMENTOS DE ONDA

### 2.2.2.1 FREQUÊNCIA

As ondas acústicas são classificadas de acordo com suas frequências e são medidos em ciclos por segundo, ou seja, o número de ondas que passam por segundo pelo nossos ouvidos. A unidade “ciclos por segundos” é normalmente conhecido por “Hertz”, abreviatura “Hz”. Assim sendo, se tivermos um som com 280 Hz, significa que por segundo passam 280 ciclos ou ondas por nossos ouvidos. Note que, frequências acima de 20.000 Hz são inaudíveis, sendo denominadas frequências ultrassônicas, conforme apresentado na Figura 2.2 [4].

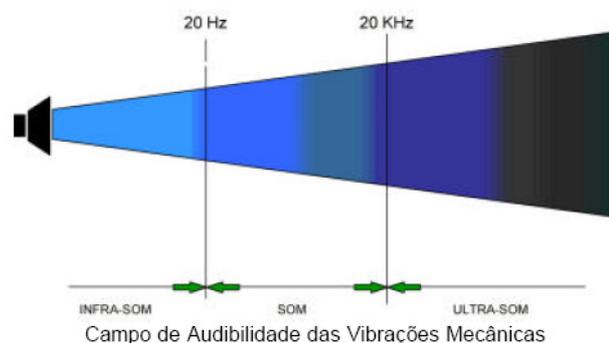


Figura 2.2 - Espectro de frequências sonoras – Fonte [4].

### 2.2.2.2 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

Existem várias maneiras de uma onda sônica se propagar, e cada uma com características particulares de vibrações diferentes. Definimos “Velocidade de propagação” como sendo a distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo. É importante lembrar que a velocidade de propagação é uma característica do meio, sendo uma constante, independente da frequência e do comprimento de onda. A velocidade do som depende da massa específica, do módulo de elasticidade, do coeficiente de Poisson e do módulo de rigidez do material. Calcula-

se o valor das ondas transversais através da seguinte expressão:  $V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$  (1),

onde  $G$  = módulo de rigidez ( $\text{kg/ms}^2$ ) e  $\rho$  = massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ). A tabela 2.1 mostra as velocidades sônicas das ondas transversais em diversos materiais [5].

**Tabela 2.1 – velocidades de propagação das ondas transversais em diversos materiais- Fonte [4].**

Velocidades de Propagação das Ondas Transversais

Material	Velocidade m/s
Ar	-
Alumínio	3100
Cobre	2300
Acrílico	1100
Alumínio	3100
Ouro	1200
Aço	3200
Aço Inoxidável	3100
Aço Fundido	2400
Nylon	1100
Óleo(SAE30)	-
Água	-
Prata	1600
Titânio	3100
Níquel	3000
Magnésio	3000

Fonte: Ultrasonic Testing, Krautkramer

### 2.2.2.3 COMPRIMENTOS DE ONDA

As características gerais das ondas ultrassônicas são convenientemente ilustradas por analogia com o comportamento das ondas produzidas por um objeto jogado na água. Uma observação rápida pode levar a conclusão errada de que as ondas circulares que vão se formando transportam a água para fora do ponto de impacto. O fato de que a água não é transportada pode ser facilmente comprovado

se observado um pequeno objeto flutuando na água, que não se move em relação ao ponto de impacto, mas apenas sobe e desce atingindo a crista ou o vale da onda. A distância entre duas cristas ou vales sucessivos é o comprimento de onda e representaremos pela letra grega Lambda “ $\lambda$ ” [4].

#### **2.2.2.4 RELAÇÕES ENTRE VELOCIDADE, COMPRIMENTO DE ONDA E FREQUÊNCIA**

Considerando uma onda sônica se propagando num determinado material com velocidade do som “V” (em m/s), frequência “f” (ciclos/s=Hz=1/s), e comprimento de onda “ $\lambda$ ” (m), podemos relacionar estes três parâmetros como segue:

$$V = \lambda \cdot f \quad (2)$$

A relação acima, permite calcular o comprimento de onda, pois a velocidade é, em geral, conhecida e depende somente do modo de vibração e a frequência depende da composição do material inspecionado.

### **2.2.3 GERAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS**

#### **2.2.3.1 EFEITO PIEZELÉTRICO**

As ondas ultrassônicas são geradas e introduzidas no material através de um elemento emissor com uma determinada dimensão e que vibra com uma certa frequência. Este emissor pode se apresentar com determinadas formas (circular ou retangular). Os elementos emissor e receptor, são denominados transdutores, também designados por cabeçotes.

O efeito piezométrico, que ocorre em alguns cristais, é obtido da seguinte maneira: se tomarmos uma lâmina de cristal piezométrico e aplicarmos dois eletrodos sobre as faces opostas de uma placa de cristal piezométrico, de maneira que possamos carregar as faces eletricamente, a lâmina comporta-se como se

estivesse sobre pressão e diminui de espessura, conseqüentemente, se aplicarmos uma energia elétrica alternada será gerada uma oscilação mecânica, isto é, transformou-se a energia elétrica em energia mecânica [4].

Tal fenômeno 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, conforme apresentado na figura 2.3, se tentarmos impedir esse movimento a placa transmite esforços de compressão às zonas adjacentes, emitindo uma onda longitudinal, cuja forma depende da freqüência de excitação e das dimensões do cristal.

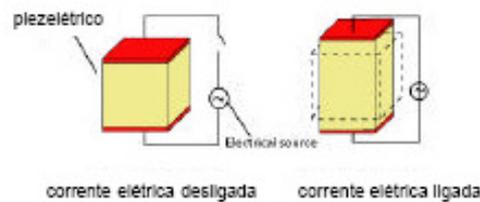


Figura 2.3 – Comportamento do cristal piezelétrico – Fonte [4].

### 2.2.3.2 TRANSDUTORES NORMAIS

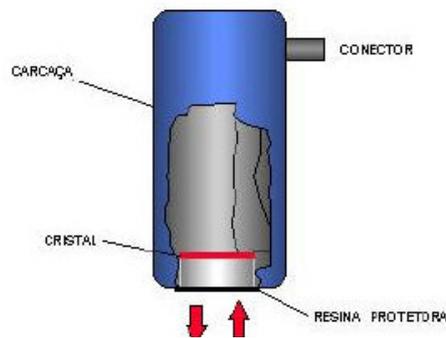
São assim chamados os cabeçotes monocristal geradores de ondas longitudinais ou transversais normal à superfície de acoplamento [4].

Os transdutores normais são construídos a partir de um cristal piezelétrico colado num bloco rígido denominado de amortecedor e sua parte livre protegida ou uma membrana de borracha ou uma resina especial. O bloco amortecedor tem função de servir de apoio para o cristal e absorver as ondas emitidas pela face colada a ele, conforme apresentado na figura 2.4.

O transdutor emite um pulso ultrassônico que atravessa o material a inspecionar e reflete nas interfaces, originando o que chamamos ecos. Estes ecos retornam ao transdutor e gera, no mesmo, o sinal elétrico correspondente.

A face de contato do transdutor com a peça deve ser protegida contra desgastes mecânicos podendo utilizar membranas de borracha finas e resistentes ou camadas fixas de epoxi enriquecido com óxido de alumínio.

Em geral, os transdutores normais são circulares, com diâmetros de 5 a 24 mm, com frequência de 0,5; 1; 2 ; 2,5 ; 5 e 6 MHz. Outros diâmetros e frequências existem, porém para aplicações especiais.



O transdutor normal tem sua maior utilização na inspeção de peças com superfícies paralelas ou quando se deseja detectar descontinuidade na direção perpendicular à superfície da peça. É o exemplo de chapas, fundidos e forjados.

Figura 2.4 - transdutor normal – Fonte [4].

### 2.2.3.3 ACOPLAMENTO

Ao encostarmos o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente se estabelece uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça.

Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em razão das características acústicas (impedância acústica) muito diferentes do material a inspecionar.

A impedância acústica "Z" é definida como sendo o produto da massa específica do meio ( $\rho$ ) pela velocidade de propagação neste meio (V), ( $Z = \rho \times V$ ) e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio [4].

Em geral, podemos calcular as frações de energia sônica, que é transmitida e refletida pela interface entre dois materiais diferentes usando as equações (3) e (4):

$$R = (Z_2 - Z_1)^2 / (Z_2 + Z_1)^2 \quad (\text{Energia refletida}) \quad (3)$$

$$T = 1 - R \quad (\text{Energia Transmitida}) \quad (4)$$

Onde:  $Z_1$  e  $Z_2$  são as impedâncias dos dois meios que formam a interface.

Como exemplo, podemos citar que a interface água e aço, apenas transmite 12% e reflete 88% da energia ultrassônica [5].

Por esta razão, deve-se usar uma substância que estabeleça uma redução desta diferença, e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais substâncias, denominadas acoplante, são escolhidas em função do acabamento superficial da peça, condições técnicas e tipo da peça. A tabela 2.2 descreve alguns acoplantes mais utilizados.

**Tabela 2.2 - Impedância acústica de alguns materiais e acoplantes – Fonte [4].**

Impedância Acústica de Alguns Materiais e Acoplantes

Acoplante	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade da onda long. (m/s)	Impedância Acústica (g/cm <sup>2</sup> .s)
Óleo ( SAE 30)	0,9	1700	1,5 x 10 <sup>3</sup>
Água	1,0	1480	1,48 x 10 <sup>3</sup>
Glicerina	1,26	1920	2,4 x 10 <sup>3</sup>
Carbox Metil Celulose (15g/l)	1,20	2300	2,76 x 10 <sup>3</sup>
Aço	7,8	5.900	46 x 10 <sup>3</sup>
Ar ou gas	0,0013	330	0,00043 x 10 <sup>3</sup>
Aço inoxidável	7,8	5.800	45,4 x 10 <sup>3</sup>
Alumínio	2,7	6.300	17,1 x 10 <sup>3</sup>
Acrílico	1,18	2.700	3,1 x 10 <sup>3</sup>
Cobre	8,9	4.700	41,6 x 10 <sup>3</sup>

Fonte: SONIC Instruments – catálogo de fórmulas e dados

Os acoplantes devem ser selecionados em função de vários : da rugosidade da superfície da área de varredura, o tipo de material, forma da peça, dimensões da área de varredura e posição para inspeção, tipo de onda, etc.

## 2.2.4 TÉCNICA DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM PULSO-ECO

É a técnica onde somente um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material e o sinal adquirido corresponde a uma sucessão de ecos provenientes da face oposta a qual o transdutor está acoplado, sendo o tempo de percurso da onda ultrassônica, o tempo medido entre dois ecos consecutivos.

### **2.2.5 APARELHAGEM DO ENSAIO DE ULTRASSOM**

O aparelho de ultrassom é basicamente um osciloscópio projetado para medir o tempo de percurso do som na peça ensaiada através da relação:  $S = V \times T$  (5), onde o espaço percorrido (S) é proporcional do tempo (T) e a velocidade de propagação (V), no material. Contém circuitos eletrônicos especiais, que permitem transmitir ao cristal piezelétrico, através do cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados, transformados pelo mesmo em ondas ultrassônicas.

Os sinais captados no cristal são mostrados na tela em forma de pulsos luminosos denominados “ecos”, que podem ser regulados tanto na amplitude, como posição na tela graduada e se constituem no registro das descontinuidades encontradas no interior do material.

## **2.3 TENSÕES RESIDUAIS**

As tensões residuais são tensões auto-equilibradas que continuam existindo numa peça quando todo o carregamento externo é removido.

O processo de fabricação é um dos principais causadores de tensões residuais em peças e estruturas. Estas tensões podem alcançar o limite de escoamento do material e combinando-se com outras tensões provocadas por efeitos externos, pode exceder o limite de resistência do material, provocando um colapso do mesmo. Por isso, se faz necessário na maioria das situações o processo de alívio de tensões.

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

Na tabela 2.3 são apresentadas as principais fonte e sub-fontes de tensões residuais.

**Tabela 2.3 - Principais fontes e sub-fontes de tensões residuais – Fonte [7].**

Fontes Principais	Sub-fontes
Carregamento elasto-plástico	Flexão, Torção, Tração, Compressão.
Usinagem	Torneamento, Fresamento, Aplainamento, Furação, Retificação.
Junções	Soldagem, Brasagem.
Fundição	
Conformação	Laminação, Trefilação, Forjamento, Estampagem, Jateamento (shot peening)
Tratamento Térmico	Tempera, Endurecimento, Cementação, Nitretação
Revestimento	Deposição, Galvanização, Revestimento.

Também, define-se as tensões residuais como sendo ordinárias, ou seja, uma tensão trativa irá somar-se com outra tensão trativa, ou ainda, uma tensão trativa irá subtrair-se com outra tensão compressiva e vice-versa. As tensões residuais podem ser aliviadas aquecendo o material até uma temperatura a qual a tensão de escoamento do material é igual ou inferior às tensões residuais presentes no material, [6]. Ou seja, neste caso as tensões residuais irão causar deformações plásticas, escoamento do material e serão aliviadas.

As tensões residuais apresentam um caráter elástico, assim, o valor máximo que estas tensões podem atingir é igual à tensão de escoamento local do material. [7]

Podemos classificar as tensões residuais como macroscópicas e microscópicas do tipo II e tipo III. As tensões macroscópicas são as tensões

residuais que se distribuem em larga escala e se equilibram por todo o componente. Na classificação das tensões residuais macroscópicas considera-se o material como sendo homogêneo, conforme apresentado na Figura 2.5.

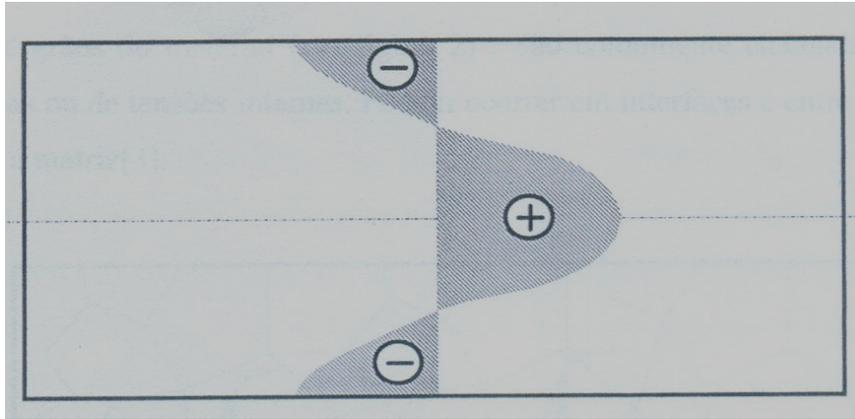


Figura 2.5 – Tensões residuais macroscópicas – Fonte [7].

As tensões residuais do tipo II também chamadas de microscópicas são formadas pela não homogeneidade da estrutura cristalina do material. Estas tensões residuais estão associadas à estrutura cristalina do material, como por exemplo, o grão e também as fases presentes no material. Estas tensões estão relacionadas ao balanço entre diferentes grãos ou fases presentes no material, conforme apresentado na Figura 2.6.

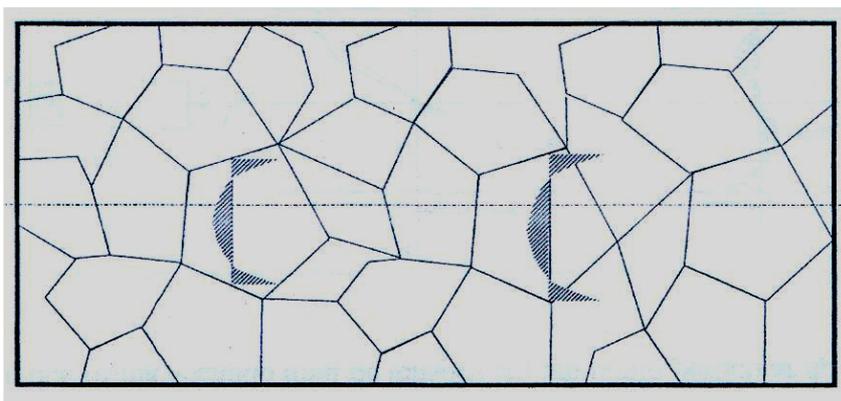


Figura 2.6 – Tensões residuais do tipo II – Fonte [7].

As tensões residuais microscópicas do tipo III existentes na escala atômica, correspondente à ação criada por todos os diferentes tipos de defeitos cristalinos,

tais como: lacunas, átomos intersticiais, discordâncias e contornos de grão, conforme apresentado na figura 2.7.

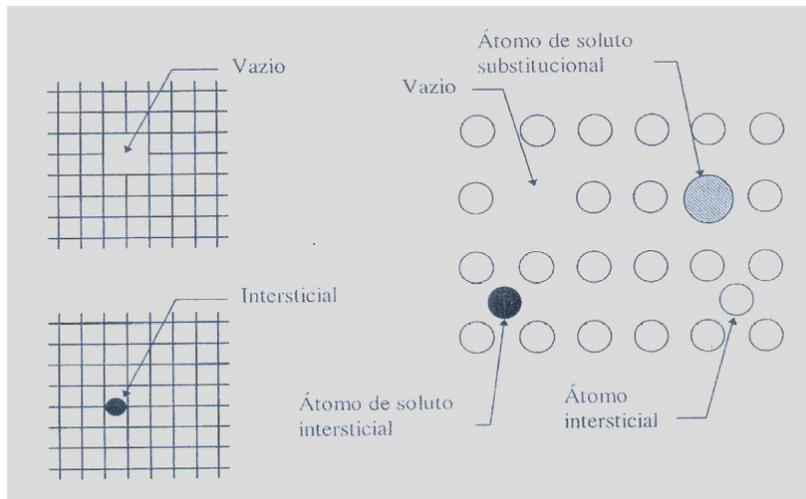


Figura 2.7 – Tensões residuais do tipo III - Fonte [7].

As tensões residuais podem ser ocasionadas por diversas condições atuando individualmente ou de forma combinada, classificadas nos seguintes tipos:[7]

- Tensões originadas por carregamento mecânico;
- Tensões originadas por efeito térmico;
- Tensões originadas por transformações metalúrgicas (tratamentos termoquímicos).

As tensões residuais surgidas devido ao resfriamento mais intenso das superfícies livres da peça não possuem caráter homogêneo ao longo da espessura da mesma, em componentes mais espessos. Este resfriamento desigual provoca deformações plásticas localizadas resultando, de uma forma geral, tensões compressivas na superfície e trativa no interior da peça.

As tensões geradas pela transformação de fases metalúrgicas são originadas no cordão de solda e na zona termicamente afetada da junta, onde surgem fases de ferrita, bainita ou martensita decorrentes da transformação da austenita. Estas novas fases, possuem um volume específico maior causando uma tendência à expansão, o que é contida pelo restante do material gerando tensões compressivas.

## 2.4 TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

São várias as técnicas de medidas de tensões residuais dividem-se em destrutivas: furo-cego, remoção de camadas e seccionamento; e não destrutivas: difração de raios-X, difração de nêutrons, técnicas de ultrassom e técnicas magnéticas [6].

Na técnica do furo cego, um pequeno furo é usinado na região de estudo. Ao furar esta região inicia-se uma deformação provocada pelo alívio de tensões devido à esta usinagem. Através de equações da teoria da elasticidade relaciona-se estas deformações com as tensões residuais.

A remoção de camadas é uma técnica aplicada em componentes planos usinando-se quimicamente as camadas superficiais do componente. Ao se remover as camadas do material onde há tensões residuais, o equilíbrio estático é perturbado instantaneamente e este equilíbrio só é restabelecido na mudança de forma do componente.

O seccionamento é uma técnica similar à técnica de remoção de camadas. As tensões residuais são obtidas pela medição da abertura da chapa. Através de extensômetros é possível medir tanto a deflexão quanto a deformação.

A técnica de difração de raio-x é aplicada com o objetivo de medir as distâncias interplanares, e com isso, calcular as tensões presentes, pois a presença de um estado de tensões provoca a deformação elástica variando o espaço entre os planos cristalinos e a orientação destes planos, isso é verificado através da Lei de Bragg.

A técnica de difração por nêutrons tem o mesmo princípio básico da difração de raios-x que é medir a distância interplanar causada pela presença de tensões.

A diferença entre a difração de raios-x e a difração de nêutrons é que nesta última os nêutrons penetram mais profundamente a amostra. E, também, a técnica de difração de nêutrons utiliza um equipamento caro e sofisticado que é o acelerador de partículas, que atua como fonte de nêutrons.

A técnica ultrassônica baseando-se nos mesmos princípios e equipamentos comerciais que são utilizados na detecção de trincas e descontinuidades, mede indiretamente o nível de tensões residuais através diferença de velocidades entre duas ondas cisalhantes polarizadas ortogonalmente que se propagam ao longo do

material tensionado e pela obtenção da constante acustoelástica do mesmo material. Na Tabela 2.4 são apresentadas as principais características de cada uma das técnicas citadas anteriormente.

**Tabela 2.4 - Vantagens e desvantagens dos métodos para medição de tensões residuais - Fonte [6].**

Técnica	Furo-Cego	Deflexão	Seccionamento	Difração de Raio X	Difração de Nêutrons	Ultra-som
Hipóteses Básicas	Tensões biaxiais uniformes na superfície do furo		Campo tridimensional de tensões	Material isotrópico, homogêneo policristalino e de granulometria fina	Material homogêneo e policristalino	Material isotrópico, homogêneo policristalino e de granulometria fina
Tipo de tensão residual captada	1º tipo	1º tipo	1º tipo	1º tipo, 2º tipo ou 3º tipo	1º tipo e 2º tipo	1º tipo + 2º tipo + 3º tipo
Parâmetro Medido	Deformação superficial Ou deslocamento	Deformação ou deflexão	Deformação superficial ou deslocamento	Mudança na distância interplanar nos materiais policristalinos	Mudança na distancia interplanar nos materiais policristalinos	Varição na velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas
Porção mínima de material analisado	0.5 mm <sup>2</sup>	1000 mm <sup>2</sup> se for medida deflexão e 100 mm <sup>2</sup> se for medida deformação	100 mm <sup>2</sup>	0.5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	De 0.1 mm <sup>2</sup> para a técnica das frequências altas e 30 mm <sup>2</sup> para a técnica convencional
Profundidade Mínima	20 µm	20 µm	1 a 2 µm	Vários microns até varias dezenas de microns	1mm	15µm até 300µm
Custo do equipamento (US\$)	10 mil à 50 mil	1000	15000	100 mil a 200 mil	Algumas centenas de milhões	40 mil a 200 mil
Portabilidade	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Incerteza em situações normais	±20 MPa	±30MPa	±10MPa	±20MPa	±30MPa	10 a 20MPa
Tempo médio para obter a primeira medição e estabelecer um perfil de tensões	40 minutos, duas horas	30 minutos, oito horas	40 minutos, entre 5 e 20 horas	20 minutos 8 horas	2 horas uma semana	Vários minutos 20 minutos
Profundidade da inspeção	0.02 a 15 mm	0.1 a 3 mm	Todas acima de 1 mm	1 a 50 µm	2 mm até 50 mm	0.015 a 3 mm para ondas superficiais e espessura do componente para ondas volumétricas

## 2.5 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE TENSÃO POR ULTRASSOM

A teoria desenvolvida para medida de tensões por ultrassom é mais fácil de ser utilizada em materiais originalmente acusticamente isotrópicos. (isto é, antes de serem submetidos à tensão). Assim, a textura dos materiais aparece como um problema para a medida de tensão por ultrassom, uma vez que influencia na velocidade da onda ultrassônica na mesma ordem de grandeza que as tensões, mascarando os resultados da medida de tensão[6].

O desenvolvimento de técnicas de ultrassom para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais começou em 1950, com a medição da velocidade das ondas para avaliar as constantes elásticas dos materiais com a variação de temperatura. Em 1953, Hughes e Kelly [8] desenvolveram a teoria acustoelástica baseada na teoria da elasticidade não linear de Murnaghan, que consistia na avaliação de mudança das velocidades das ondas de ultrassom em função das deformações elásticas (tensão) de um sólido isotrópico. O fenômeno da birrefringência foi descoberto por Bergman, Shahbender, Benson e Raelson, em 1958; os autores observaram a variação da velocidade da onda transversal quando o sentido de vibração coincidia com o da aplicação da tensão, e quando lhe era perpendicular. Crecraft, em 1967, mostrou que o ultrassom poderia ser usado para análise de tensão em componentes de engenharia [9].

Schneider [10], usou a birrefringência para caracterizar o estado de tensões volumétrico em componentes, para caracterizar a textura relacionada com as propriedades de partes laminadas de semi-produtos. Tensão e textura causam uma anisotropia elástica no componente. A birrefringência de uma onda transversal linearmente polarizada, propagada ao longo da direção da espessura do componente, foi usada para determinar as direções dos dois eixos principais. Tensões residuais no aro das rodas ferroviárias, bem como a textura de folhas laminadas, foram medidas e determinadas usando a propriedade da birrefringência.

As tensões residuais internas também podem ser medidas baseadas no efeito acustoelástico, variando-se a velocidade de propagação da onda com a variação de tensão. Landa e Plesek [11], fizeram estudos para esta aplicação. O trabalho mostrou que a dependência da tensão com a velocidade da onda, é devido à uma

deformação finita do corpo, por uma relação tensão-deformação não linear do material. O efeito acustoelástico é muito pequeno e fatores como temperatura, textura, anisotropia e plasticidade do material não podem ser desprezados na medição de tensões residuais por ultrassom. Experimentalmente, foram medidas constantes acustoelásticas de três corpos de prova prismáticos por ensaio de compressão. Foram selecionados dois materiais isotrópicos ( $\text{AlMg}_3$  e vidro óptico) e um anisotrópico ( $\text{AlCu}_4\text{BiPb}$ ). As medições usaram técnicas distintas: pulso-eco e ondas contínuas. A constante acustoelástica do  $\text{AlMg}_3$  foi calculada teoricamente pela constante elástica de terceira ordem e o resultado comparado com o ensaio prático, com resultado inferior a 10 % de diferença.[9]

A Anisotropia acústica do material é caracterizada pelo efeito acustoelástico que é a variação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, que ocorre quando estas se propagam através de um material elástico submetido à tensão, podendo estar relacionada ao estado de tensão residual através das constantes acustoelásticas de terceira ordem.

A aplicação da técnica da birrefringência acústica para medidas de tensão, onde uma onda ultrassônica cisalhante é emitida com incidência normal à superfície, com a polarização alinhada à direção de laminação e outra onda com a polarização ortogonal à esta, requer uma medida precisa do tempo de percurso da onda ultrassônica cisalhante com incidência normal para percorrer a espessura do material, onde as variações são na ordem de nanosegundos. Além disso, também, foi desenvolvido um novo método de medida [12], que com uma configuração pulso-eco utilizou-se o processamento do sinal ultrassônico com o uso de um algoritmo de correlação cruzada, que é baseada em dividir o sinal obtido com dois ecos, gerando dois sinais, em parte, idênticos. Um formado pelo primeiro eco e outro pelo sinal completo. Assim, o resultado de correlação cruzada entre dois sinais, será o atraso entre os mesmos. O tempo de percurso que a onda ultrassônica leva para propagar-se através da espessura do material é a defasagem entre os dois sinais [13].

Na correlação cruzada, cada ponto de um sinal é multiplicado e somado a todos os outros pontos do outro sinal, resultando em uma outra função, cujo o máximo indica o valor do atraso entre os dois sinais. Assim, ocorre uma comparação ponto

a ponto dos dois sinais, eliminando o erro originado ao se estabelecer a referência no máximo, melhorando a resolução e diminuindo o erro de medida de tempo.

## 2.6 ACUSTOELASTICIDADE E BIRREFRINGENCIA ACÚSTICA

A teoria linear elástica é geralmente adequada para descrever o comportamento elástico dos materiais, usando a lei de Hooke. Nesta abordagem, a energia de deformação elástica é desenvolvida para a segunda ordem de deformação e são introduzidas as constantes de Lamé,  $\lambda$  e  $\mu$ , para o caso de um meio isotrópico.

Entretanto, somente é possível a descrição teórica do efeito acustoelástico, que relaciona a influência do estado de tensão no material à velocidade da onda ultrassônica, considerando a teoria não linear da elasticidade. Murnaghan desenvolveu a conceituação da energia de deformação elástica para as deformações de terceira ordem e introduziu as constantes elásticas de terceira ordem ( $l$ ,  $m$  e  $n$  que foram então chamadas constantes de Murnaghan) [13].

Se existe alguma anisotropia elástica causada pela microestrutura ou por uma orientação preferencial de grãos no material, a velocidade das ondas cisalhantes pode apresentar mudanças maiores do que as resultantes do efeito acustoelástico [13].

Tendo por base a teoria desenvolvida por Murnaghan em 1937, Hughes e Kelly [8] em 1953 desenvolveram, como citado anteriormente, as relações básicas entre a velocidade da onda ultrassônica e a deformação que surge devido a tensão no material onde essa onda se propaga. Esse método pode ser usado quando a propagação ocorre em um meio isotrópico.

A equações desenvolvidas por Hughes e Kelly [8] podem ser representadas em termos da variação da velocidade da onda ultrassônica em relação à tensão e podem ser apresentadas, de maneira genérica, da seguinte forma:

No caso de ondas cisalhantes,

$$\frac{V_{ij} - V_c^0}{V_c^0} = k_3 \sigma_i + k_4 \sigma_j + k_5 \sigma_k \quad (6)$$

Onde  $V_c^0$  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  $k_3$  a  $k_5$  são chamadas constantes acustoelásticas normalizadas. Cada constante acustoelástica corresponde a uma relação entre a direção de propagação da onda e a direção de polarização das partículas, em relação à tensão e são obtidas a partir da variação relativa da velocidade das ondas em um material tensionado uniaxialmente, assumindo variações muito pequenas.

Em um material isotrópico, sem efeito da tensão ou textura, a onda ultra-sônica incidindo perpendicularmente ao material, quando polarizada em duas direções perpendiculares retornará ao mesmo tempo. Quando neste material é aplicada uma tensão isso não ocorre e a equação genérica da onda cisalhante, mostrada anteriormente, equação (6), combinada para as duas direções, pode ser expressa da seguinte forma:

$$B = \left( \frac{V_{31} - V_{32}}{V_c^0} \right) = (k_4 - k_5)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (7)$$

As constantes elásticas de segunda e terceira ordem são necessárias para determinar o estado de tensões por ultrassom. As constantes elásticas de segunda ordem são determinadas pela teoria elástica linear (independe do estado mecânico do material), enquanto que, as de terceira ordem precisam da teoria acustoelástica (requerem a aplicação de tensão) [9].

Quando uma onda ultrassônica se desloca numa determinada direção em um meio elástico, a sua velocidade de propagação depende, fundamentalmente, das constantes elásticas de segunda ordem do meio e, portanto, da sua simetria estrutural.

A presença de um estado de tensões elásticas produz pequenas mudanças nesta velocidade de propagação (fenômeno acustoelástico), sendo que, agora, a velocidade de propagação da onda ultrassônica depende também das constantes acustoelásticas de terceira ordem. Conseqüentemente, é possível avaliar o estado

de tensões da região percorrida pela onda ultrassônica, medindo a sua velocidade de propagação. O uso de ondas ultrassônicas longitudinais ou cisalhantes de incidência normal no modo pulso-eco, permite, em princípio, obter a tensão média na espessura das chapas metálicas.

Ondas ultrassônicas longitudinais não são usadas na técnica da birrefringência acústica. Utiliza-se duas ondas ultra-sônicas cisalhantes com incidência normal à espessura, polarizadas transversalmente uma em relação à outra. Logo, uma onda ultrassônica cisalhante incidindo perpendicularmente à superfície de um material acusticamente isotrópico, quando propagada em um mesmo volume de material, polarizada em duas direções ortogonais tem essas velocidades de propagação nas duas direções iguais. Porém, quando este material é submetido a uma tensão, torna-se acusticamente anisotrópico e essas velocidades tornam-se diferentes. Mas não só a tensão confere um comportamento acusticamente anisotrópico a um material, as condições microestruturais também, como por exemplo, as que ocorrem na textura (grãos, interfaces, segundas fases, precipitados, intertícios, lacunas e discordâncias), produzem o mesmo efeito da tensão, modificando as constantes acustoelásticas.

A técnica de medida de tensão por ultrassom denominada birrefringência acústica relaciona a diferença relativa entre as velocidades de duas ondas ultrassônicas com direções de polarização ortogonais entre si, que se propagam em um mesmo volume de material, com a diferença entre as tensões nessas direções. No caso em que a tensão cisalhante é igual a zero, significa que as direções das tensões principais coincidem com as direções de simetria ortotrópicas, conforme esta equação:

$$B - B_0 = A(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (8)$$

Onde B é a birrefringência.  $B_0$  é a birrefringência inicial, induzida apenas pela textura, ou seja, na condição em que o material não sofreu o efeito da tensão e A é

um fator denominado constante acustoelástica do material, que corresponde a um conjunto de constantes elásticas, e  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais.

A birrefringência pode ser expressa em relação as velocidades de propagação ou ao tempo de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes indicando o grau de anisotropia do material, de acordo com a equação abaixo:

$$B = \frac{V_l - V_t}{\frac{V_l + V_t}{2}} = \frac{-(t_l - t_t)}{\frac{t_l + t_t}{2}} \quad (9)$$

Onde, B é birrefringência total, induzida pelo fator microestrutural (textura) e pelo estado de tensão do material,  $V_l$  é a velocidade da onda cisalhante na direção longitudinal do material e  $V_t$  na direção transversal. E, onde  $t_l$  e  $t_t$  são os tempos de percurso da onda ultrassônica em duas direções perpendiculares.

Uma das vantagens da técnica da birrefringência acústica é que ela não é influenciada nem pela temperatura, nem pela espessura do meio, visto que para obter as tensões é necessário conhecer somente a diferença entre as velocidades de propagação de duas ondas cisalhantes polarizadas em duas direções perpendiculares entre si. Como essas velocidades de propagação das ondas de ultrassom são medidas no mesmo ponto da peça e, praticamente, ao mesmo tempo, elas são influenciadas da mesma forma pela temperatura e/ou espessura.

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

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

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

## ***CAPÍTULO 3 – METODOLOGIAS, PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E OS ENSAIOS REALIZADOS***

### **3.1 PRIMEIRA EXPERIÊNCIA – AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS**

#### **3.1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

No desenvolvimento deste trabalho, para definir a melhor metodologia e condições de trabalho na execução da pesquisa, optou-se, numa primeira etapa, verificar a influência de diferentes metodologias para medidas do tempo de percurso da onda ultrassônica em um ensaio de ultrassom, através da técnica de birrefringência acústica. Numa segunda etapa, avaliou-se a influência da variação de temperatura nas medidas de tempo de percurso da onda ultrassônica durante um ensaio de ultrassom, através da mesma técnica. Com a obtenção de dados novos e comparativos, definiu-se a melhor metodologia e condições de trabalho na aquisição dos sinais ultrassônicos, visando melhorar a confiabilidade desta técnica.

#### **3.1.2 MATERIAL DE ESTUDO**

Nestas duas etapas foi utilizado um corpo-de-prova de um material já estudado anteriormente e diferente do material em questão neste trabalho, a liga de aço 20 MnMoNi 55, devido às características e dimensões.

O corpo-de-prova (CP) é o CP3 - POSIÇÃO 6h, conforme indicado no desenho 1, é uma tira removida de um tubo de aço API 5L X46 (duto 3 - com costura), utilizado no transporte de óleo e gás, já estudado anteriormente em trabalho deste laboratório realizado junto à Petrobrás. As especificações do duto são as seguintes:

[14]

- Identificação: GRB 12 C
- $\varnothing$  externo = 12"
- Espessura da parede = 10 mm

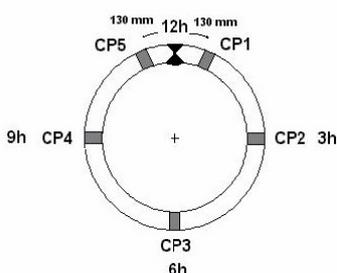


Figura 3.1 – Regiões marcadas na direção circunferencial do tubo.

As características do material do tubo são as seguintes:

- Limite de escoamento: 36,22 Kgf/mm<sup>2</sup>
- Limite de resistência: 45,82 Kgf/mm<sup>2</sup>
- Carga máxima para escoamento: 18.887,14 Kgf
- Dimensões da tira: 10,40 x 50,14 mm S= 521,456 mm<sup>2</sup>

### 3.1.3 ARRANJO EXPERIMENTAL

No desenvolvimento deste trabalho, foi montado um sistema de aquisição de dados, composto de:

- 01 transdutor cisalhante emissor/receptor, marca: Panametrics, modelo: V 155 - # 5 MHz e  $\varnothing$  13 mm;
- 01 osciloscópio digital, marca: Tektronix, modelo: TDS 3032 B – (canal 1) com:
  - Escala do eixo vertical (voltagem): 100 mV
  - Escala do eixo horizontal (tempo): 1  $\mu$ s

- 01 aparelho digital de ultrassom que funciona como gerador de pulsos, marca: Panametrics – NDT, modelo: EPOCH 4 PLUS;
- 01 filtro de amplitude, com 2 (duas) saídas, sendo uma de alta tensão (para excitar o transdutor) - 250 a 300 V e a outra de baixa tensão (para o osciloscópio) - 8V;
- 01 tubo contendo o material acoplante: COUPLANT SWC, da Panametrics;
- 01 termômetro digital com termopar, marca: Testo, modelo:177-T3;
- 01 microcomputador contendo os programas “Wave Star” (para aquisição de dados) e “Chronos ou Atraso V9” (processador matemático);
- 01 microcomputador contendo o programa “Testo” (registro das temperaturas);
  - 01 corpo-de-prova.

Diagrama esquemático do sistema ultrassônico é apresentado na figura 3.2 e na figura 3.3 são apresentadas imagens do sistema.

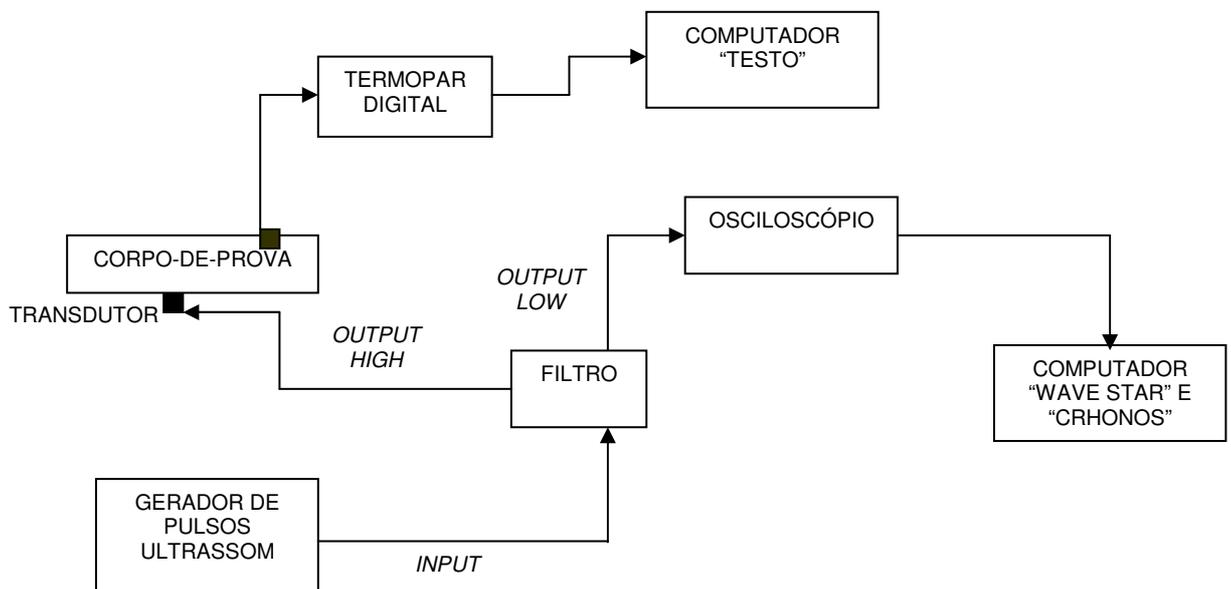


Figura 3.2 – Diagrama esquemático do sistema ultrassônico.

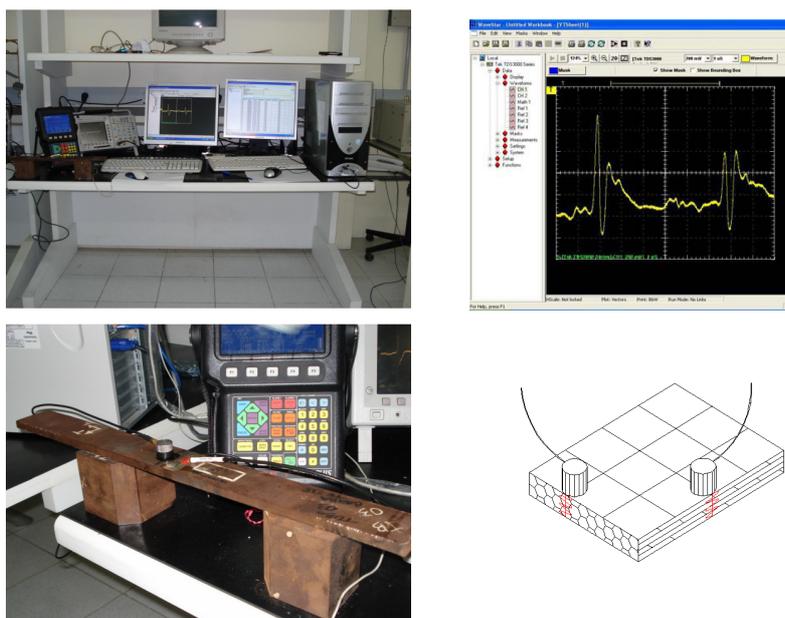


Figura 3.3 – Fotos do sistema ultrassônico montado para este trabalho, do programa “Wave Star” , detalhe do corpo-de-prova em estudo com o transdutor acoplado e o termopar e o alinhamento do transdutor longitudinalmente e transversalmente a peça.

### 3.1.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes de iniciar as medidas experimentais, foram adotados alguns procedimentos de modo a uniformizar as condições de trabalho, tanto da amostra, do ambiente e dos equipamentos utilizados, são eles:

- 1- Estabilização da temperatura (18°C) e umidade do laboratório;
- 2- Pré-aquecimento e estabilização dos equipamentos de medidas;
- 3- Remoção de impurezas na superfície do corpo-de-prova.

Com o sistema de aquisição de dados montado, os equipamentos (estabilizador, gerador de pulsos, osciloscópio, microcomputadores) e o aparelho de ar condicionado do laboratório deverão ser ligados, em torno de, 1 (uma) hora antes do início da sua utilização;

Verifica-se a posição do termopar digital no corpo de prova (CP), em estudo; Limpa-se a superfície do corpo-de-prova na região indicada para medição, primeiramente, com papel toalha umedecido com água (para retirar algum resíduo de acoplante) e, em seguida, limpa-se com papel toalha umedecido com álcool;

A seguir, aplica-se o acoplante na região do material aonde vai se medir em quantidade adequada para se evitar o desperdício e a dificuldade no acoplamento do transdutor x superfície;

Em seguida, realizam-se as medidas, tendo os cuidados de aplicar o acoplante na região do corpo-de-prova onde se pretende medir. Já com o transdutor posicionado, faz-se os ajustes no osciloscópio, de modo a permitir a visualização dos sinais resultantes de maneira adequada. Nesta primeira etapa os sinais são gravados no próprio osciloscópio. Após a aquisição das medidas, os sinais são transferidos para um microcomputador, utilizando o programa “Wave Star”. Simultaneamente, são registradas as temperaturas do material, utilizando o programa “Testo”, num segundo microcomputador onde está conectado o cabo USB do termômetro digital.

No programa “Wave Star”, os nome destes arquivos com nome de extensão “.csv”, devem seguir uma seqüência de números, sendo ímpares (1.csv, 3.csv, 5.csv,...) para os sinais ultrassônicos com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente ao corpo-de-prova. E pares (2.csv, 4.csv, 6.csv,...) para os sinais ultrassônicos com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada transversalmente ao corpo-de-prova;

O processamento matemático dos dados obtidos é feito no programa “Chronos”. Neste programa, seleciona-se o arquivo a ser processado (o primeiro, apenas), em seguida, formata-se o arquivo para o osciloscópio TDS 3032 B. Em “índices”, por exemplo, numa aquisição de 10 sinais ultrassônicos, o índice inicial é 1 e o índice final é 10. Em seguida, habilita-se a interpolação, com o fator de interpolação “4”, para L4. Ao findar o processamento, é gravado em .txt.

Com as medidas de tempo obtidas já processadas, inicia-se suas análises utilizando métodos estatísticos.

Para o ensaio de ultrassom com variações de temperaturas determinadas, foi necessário o uso dos dois aparelhos de ar condicionado digitais do laboratório de ultrassom e um bico de Bunsen, para ajudar no controle da temperatura, que é monitorada pelo programa “Testo” durante todo o ensaio, através do termopar digital ligado ao corpo-de-prova.

No início desta etapa do trabalho, a temperatura inicial selecionada nos aparelhos de ar condicionado foi de 18°C para atingir a temperatura mais baixa

possível, e ao atingi-la são obtidos os dados, então, regula-se o termostato para temperaturas mais altas, de acordo com a necessidade. O uso da chama do bico de Bunsen foi para atingir as temperaturas mais elevadas, de forma mais rápida, e também, para auxiliar no controle da temperatura no momento das aquisições, devido à pequenas variações de décimos de °C.

### **3.1.5 METODOLOGIAS**

#### **3.1.5.1 PRIMEIRA ETAPA – SOBRE AQUISIÇÃO DE SINAIS**

As metodologias da primeira etapa deste trabalho, consistem em obter medidas de tempo de percurso da onda ultrassônica no ensaio de ultrassom num único ponto do corpo-de-prova, sendo que na primeira metodologia, chamada de “Contínua”, foram obtidos 50 sinais ultrassônicos contínuos e seqüenciais, isto é, sem girar o transdutor, com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente ao corpo-de-prova (números ímpares). Em seguida, foram obtidos mais 50 sinais ultrassônicos, também contínuos e seqüenciais, agora, com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada transversalmente ao corpo-de-prova (números pares). Este procedimento foi realizado a cada dia durante cinco dias.

No sexto dia, as medidas de tempo da onda ultrassônica do ensaio foram obtidas de outra forma, pela metodologia chamada de “Par-a-par”, medidos os 100 sinais ultrassônicos par a par, formando 50 pares (sendo cada par, o conjunto de dois sinais com a polarização do transdutor alinhada e ortogonal à direção longitudinal ao corpo-de-prova), ou seja, com o transdutor posicionado na direção de polarização da onda ultrassônica longitudinalmente alinhada ao corpo-de-prova, faz-se a aquisição de um sinal (número ímpar), e, em seguida, gira-se em 90° o transdutor mantendo-o na mesma região indicada, fazendo-se, então, a aquisição de outro sinal (número par) com o transdutor posicionado na direção de polarização da onda ultrassônica transversalmente alinhada ao corpo-de-prova, e depois, retorna-se o transdutor para a posição anterior, repetindo todo este procedimento até que se atinja os cinqüenta conjuntos.

Durante a aquisição das medidas de tempo das ondas ultrassônicas, sempre verificou-se a visualização da amplitude e da base de tempo no osciloscópio, fazendo possíveis e necessários ajustes com as mãos na pressão de contato do transdutor com o corpo-de-prova. E, também, sempre foi registrada a variação da temperatura no programa “Testo”.

Com os dados obtidos e processados (tempos, birrefringências e temperaturas), posteriormente, foram realizadas comparações de procedimentos, variações de temperaturas, faixas de temperaturas, entre os cinco dias (metodologia “Contínua”), e também, comparações destes resultados com os resultados do sexto dia (metodologia “Par-a-par”), conforme a tabela 4.1.

### **3.1.5.2 SEGUNDA ETAPA – SOBRE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA**

A metodologia da segunda etapa deste trabalho consiste em obter as medidas de tempo da onda ultrassônica do ensaio de ultrassom num único ponto do corpo-de-prova obtendo 10 sinais ultrassônicos, com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente ao corpo-de-prova (1º dia) ou transversalmente (2º dia), em cada temperatura obtida.

Seguindo todo o procedimento experimental, já descrito anteriormente, nesta etapa foi utilizado um grampo para fixar o transdutor ao corpo-de-prova, procurando assim, manter uma pressão de contato constante durante todo ensaio. Teoricamente, pois a viscosidade do acoplante varia com o tempo, e a pressão no grampo não sofreu ajustes durante a aquisição destes dados.

O intervalo definido entre as temperaturas foi de 1°C, logo, para os sinais ultrassônicos com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente ao corpo-de-prova, as temperaturas foram: 19,8°C; 20,8°C; 21,8°C ; 22,8°C; 23,8°C; 24,8°C e 25,8°C. Já para os sinais ultrassônicos com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada transversalmente ao corpo-de-prova, as temperaturas foram as seguintes: 20,3°C (temperatura mais baixa medida no dia); 20,8°C; 21,8°C ; 22,8°C; 23,8°C; 24,8°C e 25,8°C.

No programa “Testo”, configurou-se o registro das temperaturas em intervalos de 5 segundos, para contribuir na monitoração das temperaturas do corpo-de-prova durante a medição dos tempos da onda ultrassônica.

## 3.2 SEGUNDA EXPERIÊNCIA – ESTUDO ACUSTOELÁSTICO DO AÇO 20 MnMoNi 55 ATRAVÉS DA METODOLOGIA SELECIONADA

### 3.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a escolha do melhor método de aquisição dos sinais ultrassônicos utilizados para a técnica da birrefringência acústica, iniciou-se o estudo da peça da liga de aço 20 MnMoNi 55 e a definição da seqüência das etapas necessárias para a realização dos ensaios ultrassônicos, os ensaios metalográficos, a análise química, os ensaios de compressão e os ensaios de flexão. Como, por exemplo, definir as dimensões dos corpos-de-prova, definir cálculos e procedimentos necessários, preparar as superfícies, executar os cortes e as usinagens no material.

### 3.2.2 MATERIAL DE ESTUDO

A peça em estudo originou-se de uma amostra do aço 20 MnMoNi 55 fornecida pela NUCLEP- NUCLEBRÁS EQUIPAMENTOS PESADOS S.A., com as seguintes dimensões: 1.070 x 230 x 120 mm. Conforme a Figura 3.4:

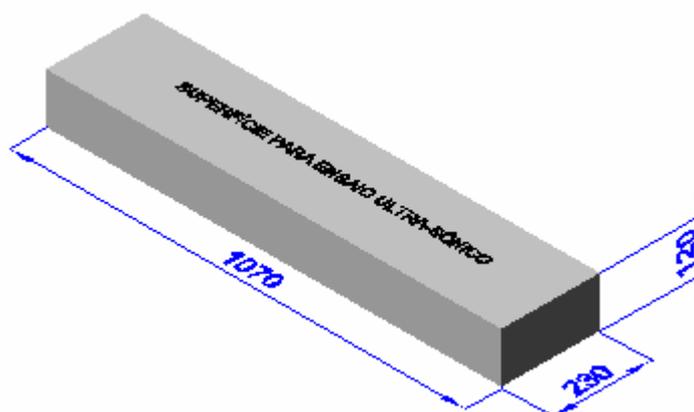


Figura 3.4 - Peça da liga de aço 20 MnMoNi 55 e suas dimensões.

E com as suas propriedades:

- Massa específica do aço: 7.850 kg / m<sup>3</sup>
- Volume da barra "A": 0,029532 m<sup>3</sup>
- Peso da barra: 231,8262 kgf
- Limite de escoamento: 50 Kgf / mm<sup>2</sup> (490 MPa)

Esta peça foi transportada do almoxarifado para o Laboratório de Fluência do IEN, onde se desenvolveram todos os ensaios ultrassônicos antes da mesma ser submetida usinagem para obtenção dos corpos-de-prova para os outros ensaios deste trabalho.

### 3.2.3 ANÁLISE QUÍMICA

A análise química, foi necessária para a confirmação do material em estudo, a liga de aço 20 MnMoNi 55, fazendo a comparação da presença e dos respectivos percentuais dos componentes químicos informados na literatura com os valores encontrados nesta análise.

Foi necessário para a execução desta análise, uma amostra do material em limalha retirada da peça em estudo.

A composição química do aço 20 MnMoNi 55 utilizado nas plantas nucleares alemães, segundo Miteva, et al [17], servirá de parâmetro para esta confirmação e é mostrada na tabela 3.1.

Tabela 3.1– Composição química do aço 20 MnMoNi 55 utilizado nas usinas nucleares da Alemanha.  
Fonte: [17]

20 MnMoNi 55 VdTUV spec. 401/3 7/83	
C	0.17 – 0.23
Si	0.15 – 0.30
Mn	1.20 – 1.50
P	≤ 0.012
S	≤ 0.008
Cr	≤ 0.20
Mo	0.40 – 0.55
Ni	0.50 – 0.80
Al	0.010 – 0.040
Cu	≤ 0.12
V	≤ 0.020
Sn	≤ 0.011
N	≤ 0.013
As	≤ 0.025

Para a análise das amostras, foi utilizada a técnica de fluorescência de raios X por dispersão em energia (EDXRF). As excitações e detecções dos raios X característicos foram realizadas sob atmosfera de ar e vácuo, quantificando-se todos os elementos químicos compreendidos na faixa do Ti ao U e do C ao Sc. Os espectros de raios X obtidos foram interpretados com o auxílio do programa AXIL. A quantificação dos elementos químicos foi realizada pela metodologia dos parâmetros fundamentais.

O equipamento utilizado é da marca Shimadzu, modelo EDX 800 HS, com as seguintes características:

- Tubo: Rh;
- Voltagem aplicada: 50 kV;
- Amperagem: 1000 uA;
- Detector: Si (Li) – resfriado com nitrogênio líquido.
- Colimador: 10 mm;
- Filtros: sem filtro.

O resultado desta análise é mostrado na tabela 3.2. E, fazendo-se a devida comparação, confirma-se que, o material em estudo é o aço 20 MnMoNi 55.

**Tabela 3.2 - Valores do resultado da análise química.**

```

Sample : Liga de aço Mn Mo Ni
Operator: Luiz
Comment : Óxido, Vac, 2canais Marco
Group : Pastilha Óxido 3mm
Date : 2008-07-11 11:16:40
  
```

Measurement Condition

---

```

Instrument: 800HS2 Atmosphere: Vac. Collimator: 3 (mm) Spin: Off
  
```

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time (sec)	DT (%)
Ti-U	Rh 50	34-Auto	----	0 - 40	0.02-40.00	Live- 100	41
Na-Sc	Rh 15	276-Auto	----	0 - 20	0.00- 4.40	Live- 100	41

Quantitative Result

---

Analyte	Result	(Std.Dev.)	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Fe	96.498 %	( 0.107)	Quan-FP	FeKa	243.4716
Mn	1.554 %	( 0.015)	Quan-FP	MnKa	3.9431
Mo	0.558 %	( 0.005)	Quan-FP	MoKa	3.8432
Ni	0.527 %	( 0.015)	Quan-FP	NiKa	0.5397
Si	0.322 %	( 0.012)	Quan-FP	SiKa	0.0331
Cr	0.172 %	( 0.005)	Quan-FP	CrKa	0.6144
S	0.122 %	( 0.006)	Quan-FP	S Ka	0.0435
Al	0.107 %	( 0.014)	Quan-FP	AlKa	0.0048
Ta	0.097 %	( 0.018)	Quan-FP	TaLa	0.0521
Cu	0.023 %	( 0.007)	Quan-FP	CuKa	0.0310
P	0.021 %	( 0.005)	Quan-FP	P Ka	0.0037

### 3.2.4 ENSAIO METALOGRAFICO

Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, permitindo observar a granulação do material, a natureza, forma, quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões, etc.

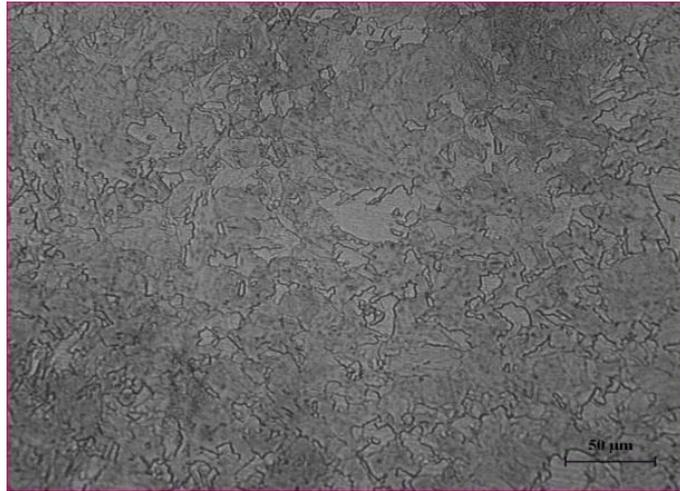
A preparação de amostras para observação estrutural exige uma preparação cuidadosa e adequada e o tempo necessário depende da composição química, tratamento térmico submetido, fases presentes e do material.

Geralmente, as amostras devem ter no máximo em torno de 1cm x 1cm para ser analisado. Assim, na obtenção de uma amostra a partir de uma peça grande deve-se conhecer claramente o objetivo da análise, para que se possa escolher a seção (longitudinal ou transversal) local a ser retirado (centro, superfície).

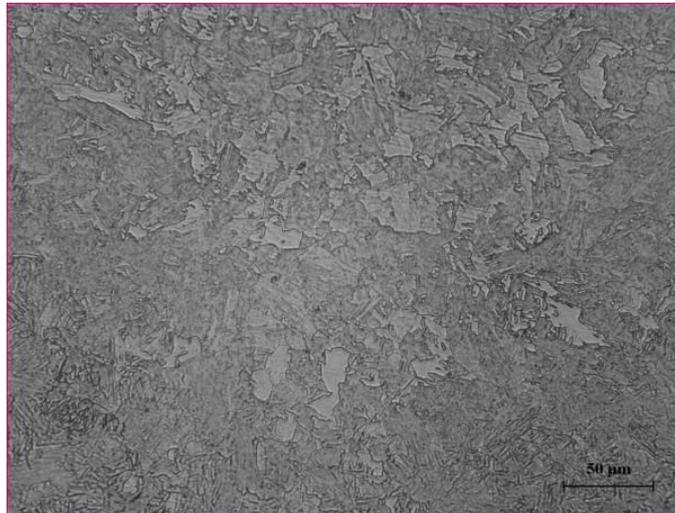
A amostra para o estudo metalográfico foi retirada de um corpo de prova do aço 20 MnMoNi 55 com as dimensões 40 x 40 x 60 cm, para confirmar a direção preferencial de laminação nesta amostra e verificar os microconstituintes existentes. Foram duas amostras, a 1ª amostra analisando a superfície onde foram realizados os ensaio ultra-sônicos e a 2ª amostra analisando a superfície perpendicular à primeira.

Não houve necessidade de executar o embutimento das amostras. O lixamento utilizando água removeu a deformação plástica produzida durante o corte da amostra, obtendo-se uma superfície plana e paralela para o subsequente polimento. O polimento foi executado numa politriz com prato giratório utilizando-se o abrasivo óxido de alumínio. No ataque químico por imersão à temperatura ambiente, para revelar os componentes estruturais da amostra tornando-se visível as partes química e fisicamente distintas, a orientação dos grãos na superfície e as inclusões (que interrompem a matriz metálica acarretando alta concentração de tensões, por extinguir a distribuição uniforme de tensão). Utilizou-se, primeiramente, o reativo Villela - 5ml - HCl – 1 grama de ácido pírco e 100 ml de álcool etílico, não havendo muito sucesso com as imagens obtidas. Então, optou-se por utilizar o Nital 2%, onde conseguiu-se imagens mais nítidas da microestrutura deste material, permitindo a revelação de alguns componentes microestruturais, mas evidenciando-se a presença de contornos de grãos de ferrita

e na revelação detalhada da bainita. A bainita é orientada aleatoriamente na matriz de ferrita, o que dá maior resistência. Já a ferrita proporciona ductilidade [18]. Como mostram as figuras 3.5 e 3.6.



**Figura 3.5 - Imagem da microestrutura- 1ª amostra.**



**Figura 3.6 - Imagem da microestrutura- 2ª amostra.**

### 3.2.5 ARRANJO EXPERIMENTAL

Para desenvolver esta segunda experiência, foi montado um sistema ultrassônico, composto de:

- 01 osciloscópio digital, marca: Tektronix, modelo: TDS 3032 B – (canal 1);
- 01 aparelho convencional de ultrassom que funciona como gerador de pulsos gerador de pulsos, marca Krautkramer, modelo USK6 NB;
- 01 filtro de amplitude, com 2 (duas) saídas, sendo uma de alta tensão (para excitar o transdutor) - 250 a 300 V e a outra de baixa tensão (para o osciloscópio) - 8V;
- 01 tubo contendo o material acoplante: COUPLANT SWC para incidência normal, da Panametrics;
- 01 computador contendo os programas “Wave Star” (para aquisição de dados) e “Chronos ou Atraso V9” (processador matemático);
- 01 corpo-de-prova (Barra de aço 20 MnMoNi 55).

Conforme a Figura 3.7.

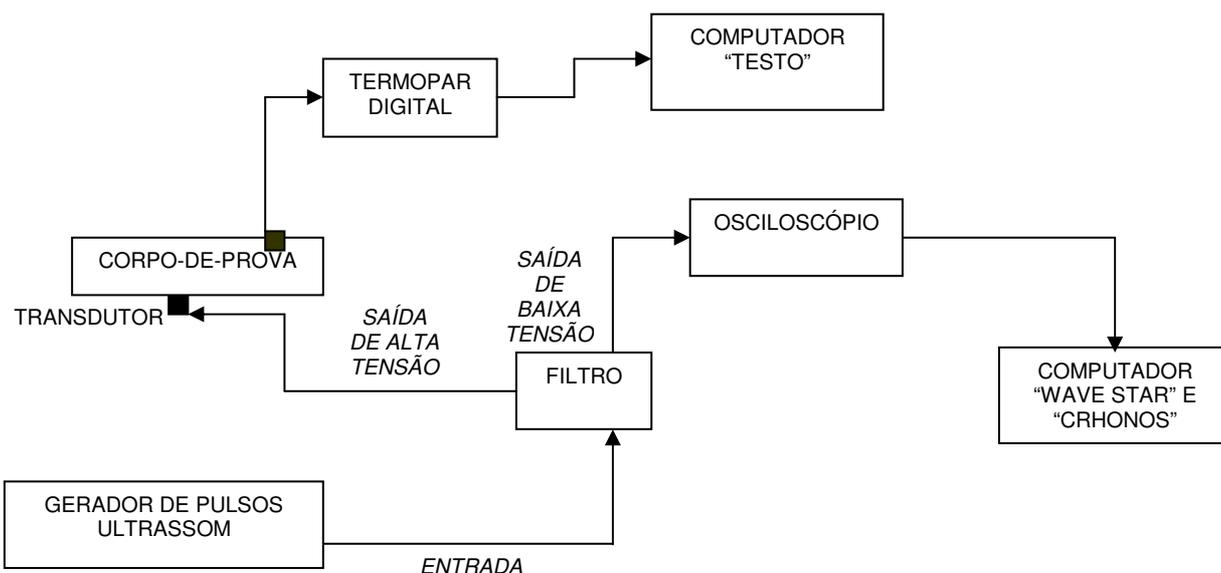


Figura 3.7 – Diagrama esquemático do sistema ultrassônico.

E foram testados os transdutores descritos a seguir, para avaliar o que proporciona melhores sinais ultrassônicos.

- 01 transdutor cisalhante emissor/receptor, marca: Panametrics, modelo: V 155 - # 5 Mhz e  $\varnothing$  13 mm;
- 01 transdutor cisalhante emissor/receptor, marca: Panametrics, modelo: V 154 - # 2,25 Mhz e  $\varnothing$  13 mm;
- 01 transdutor cisalhante emissor/receptor, marca: Panametrics, modelo: V 155 - # 1 Mhz e  $\varnothing$  13 mm;
- 01 transdutor cisalhante emissor/receptor, marca: Panametrics, modelo: V 151 - # 0,5 Mhz e  $\varnothing$  25 mm;

### **3.2.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Com o sistema ultrassônico montado, os equipamentos (estabilizador, gerador de pulsos, osciloscópio, computador) e o aparelho de ar condicionado do laboratório foram ligados, em torno de, 1 (uma) hora antes do início da sua utilização;

Lembrando-se que, o próprio aluno foi o responsável pelo acoplamento transdutor x CP e pela aquisição de dados pelo CP;

A superfície do corpo-de-prova foi limpa na região indicada para medição, primeiramente, com papel toalha umedecido com água (para retirar algum resíduo de acoplante) e, em seguida, foi limpa com papel toalha umedecido com álcool;

O acoplante foi aplicado nesta região em quantidade adequada para se evitar o desperdício e a dificuldade no acoplamento do transdutor x superfície;

O transdutor foi acoplado na região, fazendo os ajustes necessários até atingir uma perfeita visualização da amplitude e da base de tempo no osciloscópio, verificando através do botão cursor, a existência de somente os 2 (dois) primeiros ecos do espectro, para a perfeita aquisição em cada posição do transdutor ultrassônico;

Após obter o perfeito acoplamento do transdutor com o CP, já pode se salvar o primeiro sinal no próprio osciloscópio;

O sinal ultrassônico é transmitido ao material e seu eco retorna ao osciloscópio, onde são observados os sinais do pulso de excitação do cristal piezelétrico e do seu eco.

No microcomputador, onde está conectado o osciloscópio, abrir o programa “Wave Star” e prepará-lo para capturar a imagem do espectro salvo no osciloscópio no início da aquisição dos sinais;

No programa “Wave Star”, a seqüência da preparação para obter a imagem é a seguinte: “Wave Star” > local > TDS 3000 series > data > wave forms > file > new data sheet > YT sheet > CH 1 (arrastar até a tela e a imagem aparece) > file > export data sheet > csv (salvar arquivo);

Para as próximas aquisições, o procedimento no “Wave Star”, com o sinal salvo no osciloscópio, é: acionar o ícone “refresh sheet” (atualizar) e file > export data sheet > csv (salvar arquivo na pasta desejada);

Os nomes destes arquivos com nome de extensão “.csv”, devem seguir uma seqüência de números, sendo ímpares (1.csv, 3.csv, 5.csv,...) para os sinais ultrassônicos com a direção da polarização da onda ultra-sônica alinhada longitudinalmente ao corpo-de-prova. E pares (2.csv, 4.csv, 6.csv,...) para os sinais ultra-sônicos com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada transversalmente ao corpo-de-prova;

O processamento matemático dos dados obtidos será feito no programa “Chronos”. Neste programa, em “modos do programa” escolhe-se “vários arquivos”. Em “opções do arquivo de entrada”, seleciona-se o arquivo a ser processado (o primeiro, apenas), em seguida, formata-se o arquivo para o osciloscópio TDS 3032 B. Em “índices”, numa aquisição, por exemplo, de 10 sinais ultrassônicos, o índice inicial é 1 e o índice final é 10. Em “ecos”, o número de ecos é 2, e o eco 1 é 1, e o eco 2 é 2. Caso seja necessário o cálculo de  $B$ ,  $B_0$  ou de Tensão, seleciona-se em “opções do cálculo de sigma” uma das três opções.

Em “opções”, iniciamos o processamento. Ao findar o processamento, indicando 100% em “status”, em C:/windows/temp localizamos o arquivo “resultados”, salvando o mesmo em .txt e o direcionando para a pasta desejada;

Com as medidas de tempo obtidas já processadas, inicia-se suas análises através de gráficos, em excel, e utilizando ferramentas de estatística, também, em excel.

### 3.2.7 METODOLOGIA

Foi definida a superfície a ser submetida aos ensaios ultrassônicos, confirmando a área delimitada (para evitar as possíveis zonas termicamente afetadas, pois duas faces transversais a esta superfície tinham indicação de oxicorte), para marcar o maior número possível de pontos para a aquisição de dados em função do  $\varnothing_{\text{ext}}$  (18mm) do transdutor escolhido inicialmente, e quantos sinais seriam obtidos em cada ponto (10 sinais ou 50 sinais com o transdutor posicionado na direção da polarização da onda ultrassônica longitudinalmente alinhada a peça e mais 10 ou 50 sinais, girando o transdutor em 90°, posicionando-o na direção de polarização da onda ultrassônica transversalmente alinhada ao corpo-de-prova), para se obter um conteúdo de informações suficiente para analisar o material.

Com a barra posicionada (no Laboratório de Fluência), iniciou-se a preparação da superfície escolhida para o ensaio. Devido à presença de oxidação na mesma, foi executado um trabalho de lixamento manual utilizando-se lixas d'água nº 100.

Após retirar toda a camada de oxidação desta superfície, iniciou-se o trabalho de delineamento da área onde será realizado o ensaio ultrassônico, efetuando a marcação e as respectivas indicações para identificar cada ponto durante a aquisição de dados. Este trabalho foi executado com o auxílio de régua de aço, esquadros de aço, trena, riscador e caneta "marcadora". E através das fotos na figura 3.8, mostra-se como ficou a superfície para o ensaio ultrassônico:



Figura 3.8 – Fotos da superfície pronta da peça para o ensaio ultrassônico.

Com a definição do tamanho dos pontos para a aquisição dos dados, sendo 18 x 18 mm e evitando as regiões das zonas termicamente afetadas, a área para o ensaio ultrassônico atingiu as seguintes dimensões: 144 x 720 mm, possibilitando 8 linhas na direção longitudinal da superfície e 40 colunas na direção transversal da superfície, totalizando 320 pontos para aquisição de dados. Sendo cada ponto identificado com um número seguido de uma letra (1 A, 20 D, 40 H), conforme a figura 3.9.

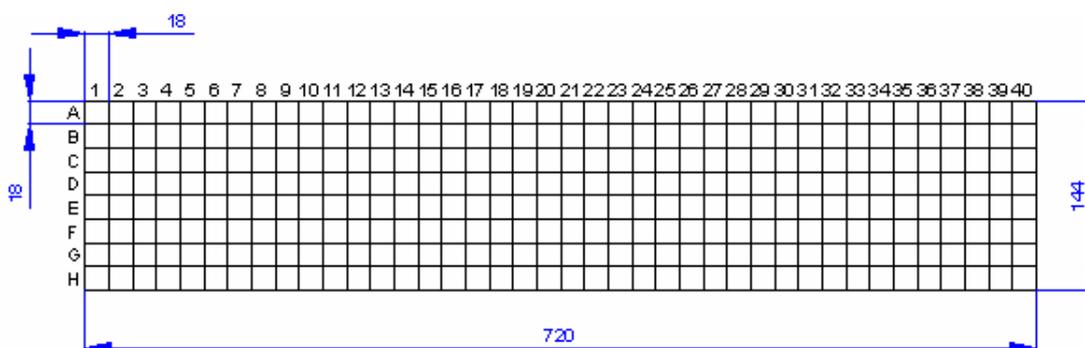


Figura 3.9 – Distribuição e dimensionamento dos pontos para aquisição de dados – 320 pontos (dimensões em mm).

Após a conclusão desta etapa, passou-se para a montagem do sistema de aquisição de dados, já descrito anteriormente.

Inicialmente, foi necessário testar e verificar a capacidade do sistema ultrassônico de obter as medidas de tempo de percurso da onda ultrassônica na peça de aço 20 MnMoNi 55 com espessura de 120 mm.

Nas primeiras tentativas utilizando o transdutor de 5 MHz, foi verificada a dificuldade de se visualizar no osciloscópio os sinais dos 2 primeiros ecos. Após vários ajustes no osciloscópio, decidiu-se pela troca para um transdutor de frequência de 2,25 MHz.

Com isso, já foi possível visualizar os sinais dos 2 primeiros ecos, mas com alguma dificuldade, mesmo com os ajustes.

Diante disso, trocou-se novamente o transdutor, agora por um de 1 MHz, mas com o mesmo  $\varnothing_{ext}$ . Assim, com esta configuração, os sinais dos 2 primeiros ecos foram visualizados, tanto na amplitude quanto na base de tempo do osciloscópio, permitindo iniciar o trabalho de aquisição de dados, propriamente dita.

A necessidade de se usar um transdutor de baixa frequência coincide com a estrutura metalográfica deste aço, uma vez que é conhecido que o mesmo apresenta bandas de segregação na sua microestrutura que geram grande atenuação da onda ultrassônica.

Para começar a conhecer melhor o material e confirmar, através dos resultados dos dados obtidos, se esta é a melhor configuração do sistema, ficou definida a aquisição dos tempos de percurso da onda ultrassônica nos pontos 1 A, 20 A, 40 A, 1 D, 20 D, 40 D, 1 H, 20 H, 40 H. Conforme mostrado na tabela 4.4.

Lembrando que, na área para o ensaio ultrassônico com 144 x 720 mm, a direção longitudinal é a de maior dimensão (720 mm) e a direção transversal é a que mede 144 mm. Conforme a metodologia escolhida na primeira experiência, em cada ponto, foram obtidos 3 conjuntos de medidas de tempo de percurso da onda ultrassônica no ensaio de ultrassom, sendo obtidos 10 sinais ultrassônicos contínuos e seqüenciais, isto é, sem girar o transdutor, com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente ao corpo-de-prova (números ímpares). E, a seguir, são obtidos mais 10 sinais ultrassônicos, também contínuos e seqüenciais, agora, girando-se em 90° o transdutor, com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada transversalmente ao corpo-de-prova (números pares). Este procedimento foi realizado como dito acima, 3 vezes para cada ponto.

Durante a aquisição das medidas de tempo das ondas ultrassônicas, sempre verificou-se a visualização da amplitude e da base de tempo no osciloscópio, fazendo possíveis e necessários ajustes na pressão de contato do transdutor com o corpo-de-prova. Estes ajustes podem variar de acordo com a sensibilidade de cada operador deste sistema, podendo influenciar nos resultados.

Foi identificado neste trabalho um problema durante o uso do programa "Chronos" ao habilitar a interpolação, seja L2, L4 ou L16, em "tipo de processamento". Os resultados encontrados nas birrefringências dos tempos de percurso da onda ultrassônica em alguns dos 10 sinais eram bem diferentes. E, ao se repetir o processamento matemático sem o uso do fator de interpolação, os valores encontrados eram coerentes. Por isso, neste trabalho foi ignorado o uso fator de interpolação. A tela do programa é mostrada na figura 3.10.

Para verificar o método de aquisição de tempos de percurso da onda ultrassônica com 10 sinais ultrassônicos contínuos e seqüenciais, para cada direção da polarização da onda ultra-sônica alinhada longitudinalmente e transversalmente à peça, se estaria indicando uma informação correta. Foi refeita nos pontos 1 A, 20 D e 40 H, a aquisição de tempos de percurso da onda ultrassônica utilizando o mesmo método, só que, ao invés de serem apenas 10 sinais, foram realizados 50 sinais ultrassônicos contínuos e seqüenciais, para cada direção da polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente e transversalmente à peça. Isto totaliza um total de 100 sinais em cada ponto.

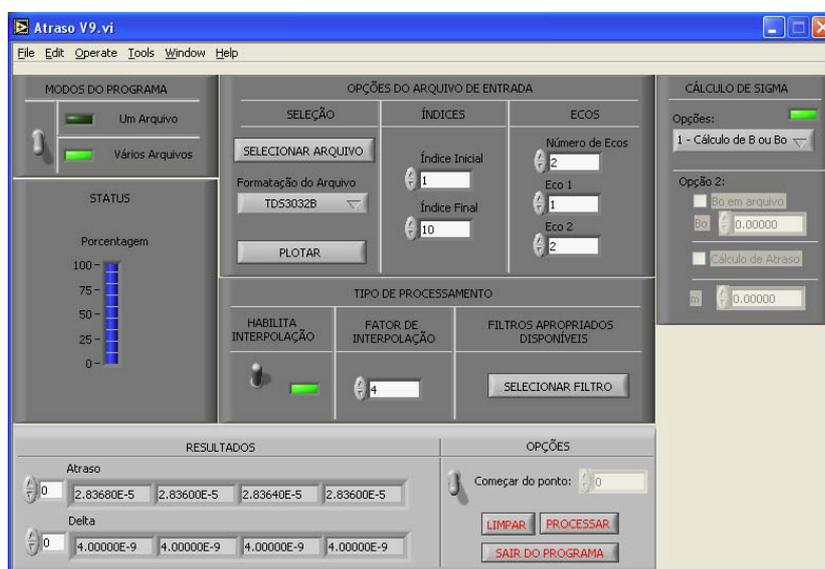


Figura 3.10 – Visualização da tela do programa “Chronos” no microcomputador.

Os resultados obtidos para definir a melhor metodologia para a aquisição dos sinais ultrassônicos neste material, são mostrados na tabela 4.4, que relaciona os valores de percentual dos dados dispersos, percentual dos dados válidos, os tempos médios obtidos em ns, as variações do tempo em ns para os tempos longitudinais e transversais em cada posição.

### 3.2.8 USINAGEM DA PEÇA DE AÇO 20 MnMoNi 55

Após a conclusão da varredura dos sinais ultrassônicos em todos os 80 pontos para analisar o comportamento acustoelástico na peça do aço 20 MnMoNi 55, foi necessária a usinagem desta peça para a obtenção dos corpos-de-prova para os

ensaios metalográficos, a análise química, os ensaios de compressão e de flexão. Devido às dimensões desta peça, não foi possível executar os serviços de corte nas oficinas do IEN. A peça foi transportada para o laboratório de CETEC Solda - SENAI, onde iniciou-se o trabalho de oxi-corte e usinagem, seguindo as orientações conforme descrito a seguir.

A barra de aço 20 MnMoNi 55 (barra "A"), foi cortada em todo o seu comprimento (1.070 mm), para se fabricar 2 (duas) peças (barra "B" e barra "C"), com a largura de 115 mm, cada. Conforme a figura 3.11.

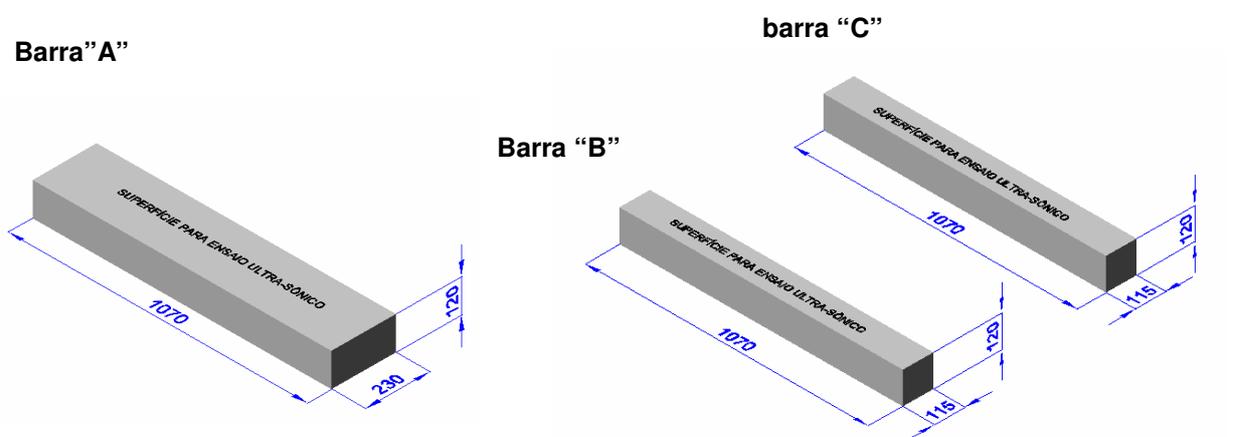


Figura 3.11 – Dimensões das barras "A", "B" e "C" (dimensões em mm).

A barra "B", foi destinada para a fabricação dos corpos-de-prova para os ensaios de compressão e de metalografia. Sempre identificando a superfície para ensaio ultrassônico em cada etapa do processo, efetuando os cortes necessários na face oposta à esta.

Ficou definido que a superfície para o ensaio ultrassônico dos corpos-de-prova, seria uma área de 60 x 40 mm. Logo, o 1º corte na largura de 115 mm da barra "B", foi para atingir 60 mm em toda a barra, chamada agora de barra "D".

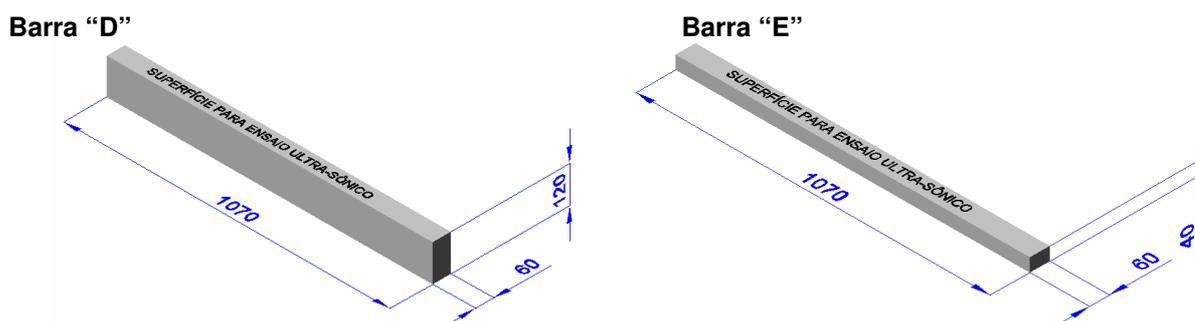


Figura 3.12 – Dimensões das barras "D" e "E" (dimensões em mm).

Em seguida, nesta barra “D”, o próximo corte foi na altura de 120 mm, para atingir 40 mm em toda barra, agora chamada de barra “E”, conforme a figura 3.12.

Assim, nesta nova barra “E” marcou-se no seu comprimento, a medida de 40 mm para cada corpo-de-prova, e cortou-se os corpos-de-prova (quantidade: 06 C.P.’S). Conforme a figura 3.13.

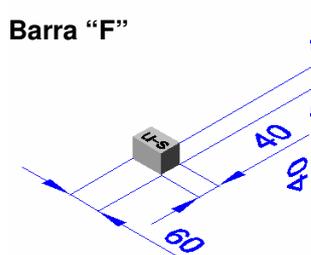


Figura 3.13 – Dimensões da barra “F” (dimensões em mm).

A barra “C”, foi destinada para a fabricação do corpo-de-prova de ensaio de flexão. Identificando sempre a superfície para ensaio de ultrassom em todas as etapas do processo, e efetuando os cortes necessários na face oposta a esta.

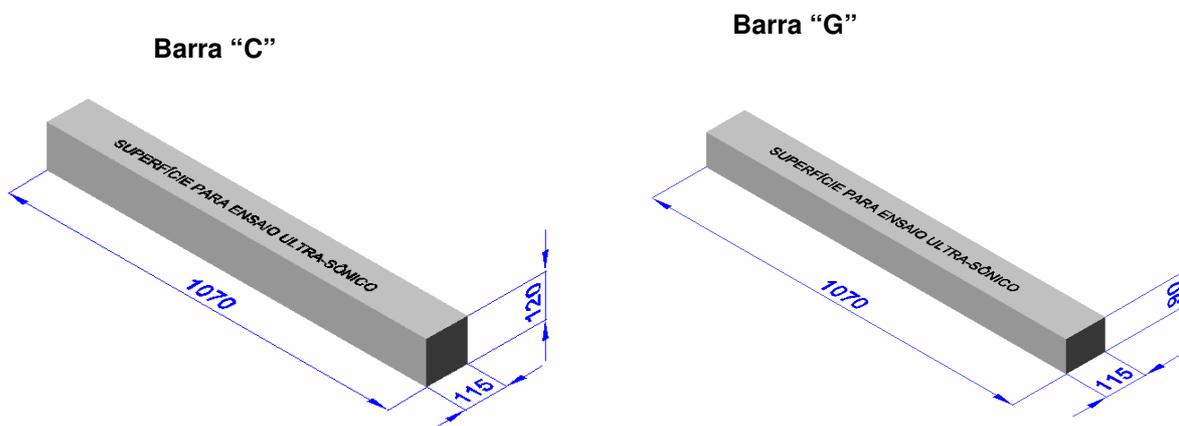


Figura 3.14 – Dimensões das barras “C” e “G” (dimensões em mm).

Na altura de 120 mm, foi efetuado um corte próximo à face oposta da superfície de ensaio ultrassônico para se atingir a altura de 90 mm, pois esta, é a medida definida para a barra ser apoiada na estrutura da prensa, que possui uma largura de 100 mm. Logo, as faces que se distanciam de 115 mm, iriam receber o contato dos

pistões da prensa. Essa nova barra foi chamada de barra “G”, conforme a figura 3.14.

### 3.2.9 OBTENÇÃO DA CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA

Nos casos onde a birrefringência acústica é utilizada para determinação do estado de tensões presentes no material, é necessário o conhecimento da constante acustoelástica do material. Esta pode ser obtida de acordo com a equação proposta por Schneider [10]:

$$m = \frac{8\mu^2}{4\mu + n} \quad (11)$$

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

Em casos onde não se possui o valor das constantes elásticas do material para aplicação direta da fórmula da constante acustoelástica, essa pode ser obtida de forma experimental através de um ensaio de compressão uniaxial.

Do mesmo modo que o ensaio de tração, o ensaio de compressão pode ser executado na máquina universal de ensaios, com a adaptação de duas placas lisas - uma fixa e outra móvel. É entre elas que o corpo-de-prova é apoiado e mantido firme durante a compressão. As relações que valem para a tração valem também para a compressão, a lei de Hooke também vale para a fase elástica da deformação, e é possível determinar o módulo de elasticidade para diferentes materiais. Isso significa que um corpo submetido a compressão também sofre uma deformação elástica e a seguir uma deformação plástica. Na fase de deformação elástica, o corpo retornaria a dimensão original quando se retira a carga de compressão. E na fase de deformação plástica, o corpo retém uma deformação residual depois de ser descarregado.

### 3.2.9.1 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Tanto nos corpos-de-prova para ensaios de compressão para a obtenção da constante acustoelástica como para o ensaio de flexão, o transdutor esteve sempre acoplado a mesma superfície da peça de aço 20 MnMoNi 55.

O ensaio de compressão foi executado para obter a constante acustoelástica da liga de aço 20 MnMoNi 55. Com o corpo-de-prova comprimido foram realizadas medidas do tempo de percurso da onda ultrassônica. O corpo-de-prova foi dimensionado de maneira a atender durante o ensaio, uma faixa de carregamentos aplicados até um valor inferior ao seu limite de escoamento, com isso, obteve-se uma reta que exprime o comportamento da variação do tempo de propagação da onda ultrassônica em função da tensão aplicada. Então, a partir desse comportamento foi possível obter a constante acustoelástica que é o próprio coeficiente angular desta reta.

Foram realizados dois ensaios de compressão uniaxial para o levantamento da constante acustoelástica em dois corpos-de-prova do aço 20 MnMoNi 55, o primeiro com as dimensões 40 x 40 x 60 mm e o segundo com as dimensões 40 x 40 x 40 mm, em uma prensa universal com capacidade máxima de carregamento de 50.000 Kg, marca: ENERPAC.

No primeiro ensaio de compressão a direção de carregamento coincide com a direção transversal da peça do aço 20 MnMoNi 55. E no segundo ensaio, em outro corpo-de-prova, a direção de carregamento coincide com a direção longitudinal.

A aquisição das medidas de tempo de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes normais à espessura, foi realizada antes e durante o carregamento. Em cada condição de carga foram realizadas cinco medidas de tempo para cada direção ortogonal uma a outra, e com as suas médias foram calculadas as suas respectivas birrefringências acústicas.

Foram executadas 6 cargas durante o carregamento para cada corpo-de-prova, são elas: 5.000 kg, 10.000 kg, 15.000 kg, 20.000 kg, 25.000 kg e 30.000 kg. Em cada carga eram feitas as medidas de tempo ultrassônico com o objetivo de levantar o comportamento linear da birrefringência acústica em função da tensão

aplicada, obtendo-se assim, a constante acustoelástica do material, que é o coeficiente angular da reta obtida.

A constante acustoelástica é necessária para a análise quantitativa dos valores de tensão obtidos pela técnica de birrefringência acústica e independe da anisotropia inicial e da frequência do transdutor [13].

Sendo o limite de escoamento do aço 20 MnMoNi 55 à temperatura ambiente no valor de  $50 \text{ kg/mm}^2$  (490 MPa), as dimensões do corpo-de-prova foram definidas também em função das medidas dos pistões hidráulicos da prensa universal. Assim, o corpo-de-prova com uma área de  $1.600 \text{ mm}^2$  (40 x 40 mm), sendo aplicada uma carga de 50.000 kg (capacidade máxima de carregamento da prensa universal), a tensão seria de 31, 25 Kgf/mm<sup>2</sup>. Valor em torno de 62,5% do valor limite de escoamento do material.

Para este ensaio, o sistema ultrassônico e o arranjo experimental são os mesmos utilizados na aquisição dos tempos na etapa da análise da anisotropia do material, mas utilizando desta vez, apenas o transdutor de 0,5 MHz e  $\varnothing_{\text{externo}}$  de 36 mm. Como mostra a figura 3.15.



Figura 3.15 – Fotos do ensaio de compressão.

### 3.2.10 ENSAIO DE FLEXÃO

#### 3.2.10.1 CÁLCULO DA TENSÃO EM FLEXÃO

O ensaio de flexão fornece dados que permitem avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais.

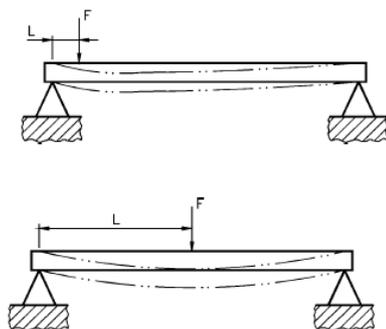


Figura 3.16 – Exemplo de ensaio de flexão.

Visualizando uma barra apoiada em dois pontos, se aplicado um esforço próximo a um dos apoios, a flexão será pequena, mas se aplicar o mesmo esforço no ponto central da barra, a flexão será máxima. Logo, verifica-se que a flexão da barra não depende só da força, mas também da distância entre o ponto onde a força é aplicada e o ponto de apoio.

O produto da força pela distância do ponto de aplicação da força ao ponto de apoio origina o que é chamado de momento, que no caso da flexão, é o momento fletor ( $M_f$ ).

Nos ensaios de flexão, a força é sempre aplicada na região média do corpo-de-prova e se distribui uniformemente pelo corpo. Na fórmula para se calcular o momento fletor, considera-se a metade do valor da força  $\frac{F}{2}$  e a metade do comprimento útil do corpo-de-prova  $\frac{L}{2}$ , então, a fórmula matemática para calcular

$$\text{o momento fletor é } M = \frac{F}{2} \times \frac{L}{2} \Rightarrow M_f = \frac{FL}{4} \quad (12)$$

Outro elemento necessário é o momento de inércia da seção transversal, para cada formato existe um momento de inércia diferente.

O momento de inércia ( $J$ ) é calculado por fórmulas matemáticas:

- Momento de inércia para corpos de seção circular:  $J = \frac{\pi D^4}{64} \quad (13)$

- Momento de inércia para corpos de seção retangular:  $J = \frac{b \times h^3}{12} \quad (14)$

Existe um elemento que completa a fórmula de cálculo da tensão de flexão: é o módulo de resistência da seção transversal, representado convencionalmente pela letra  $W$ . Trata-se de uma medida de resistência em relação a um momento. Este módulo significa para a flexão o mesmo que a área da seção transversal significa para a tração.

O valor deste módulo é conhecido dividindo-se o valor do momento da inércia ( $J$ ) pela distância da linha neutra à superfície do corpo-de-prova da figura 3.16. Em

linguagem matemática:  $W = \frac{J}{c}$ . (15)

Nos corpos-de-prova de seção circular, de materiais homogêneos, a distância “ $c$ ” equivale à metade do diâmetro. Em corpos de seção retangular ou quadrada, considera-se a metade do valor da altura.

Com isso, a fórmula para o cálculo da tensão de flexão (TF) é:  $TF = \frac{M_f}{W}$  (16)

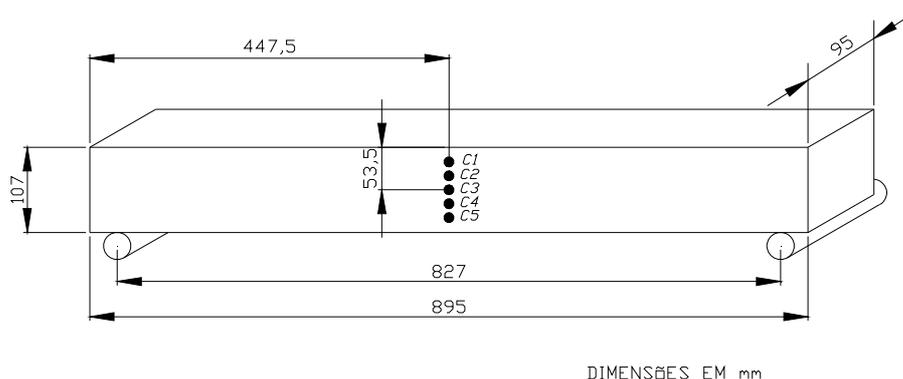
Uma vez realizado o ensaio, para calcular a tensão de flexão basta substituir as variáveis da fórmula pelos valores conhecidos. A combinação das fórmulas anteriores, mostrada a seguir, permite trabalhar diretamente com esses valores.

$$TF = \frac{M_f}{W}, M_f = \frac{FL}{4} \text{ e } W = \frac{J}{c} \Rightarrow TF = \frac{\frac{FL}{4}}{\frac{J}{c}} \Rightarrow TF = \frac{FL}{4} \times \frac{c}{J} \Rightarrow TF = \sigma = \frac{FLc}{4J} \quad (17)$$

### 3.2.10.2 METODOLOGIA DO ENSAIO DE FLEXÃO

Nesse trabalho, o ensaio de flexão, foi realizado após o ensaio de compressão, no qual obtemos o valor da constante acustoelástica do material. Neste ensaio de flexão, durante a aplicação das cargas, analisou-se as tensões com o ensaio ultrassônico através da técnica da birrefringência acústica, nos pontos determinados. Mostrando a capacidade dessa técnica avaliar as regiões de maior tensão e diferenciar as regiões compressivas e trativas na barra durante este ensaio de flexão de forma qualitativa.

Na mesma superfície utilizada para o ensaio ultrassônico em todas as etapas deste trabalho, com o corpo-de-prova com as seguintes dimensões: 895 x 107 x 95 mm, sendo a distância entre os apoios da prensa hidráulica de 827 mm, foram selecionados cinco pontos no eixo de simetria, conforme Figura 3.17.



**Figura 3.17** – Disposição dos pontos analisados no corpo-de-prova para o ensaio de flexão. A distância vertical entre os pontos é de 17,5 mm.

Apenas a região de aplicação da carga será estudada neste trabalho, pois é a região onde há maior influência da tensão, conforme a teoria da resistência dos materiais. As variações de  $B$  em relação à  $B_0$  também são maiores na região de aplicação da carga do que em outras regiões.

A aquisição das medidas de tempo de percurso das ondas ultrassônicas cisalhantes normais à espessura, foi realizada antes e durante os carregamentos. Foi utilizado o mesmo sistema ultrassônico com o mesmo arranjo experimental utilizados na aquisição dos tempos na etapa de análise da anisotropia do material, mas utilizando desta vez, apenas o transdutor de 0,5 MHz. Em cada ponto foram realizadas cinco medidas de tempo com a direção de polarização do transdutor alinhada longitudinalmente à peça e cinco medidas de tempo para a direção de polarização do transdutor alinhada transversalmente à peça. E com suas médias foram calculadas as respectivas birrefringências acústicas antes do carregamento ( $B_0$ ) e durante o carregamento ( $B$ ).

O corpo-de-prova e os carregamentos para este ensaio foram dimensionados de maneira a não ultrapassar o valor do limite de escoamento deste aço, lembrando

que a prensa universal utilizada neste ensaio tem sua capacidade máxima de carregamento de 50.000 kg, marca ENERPAC.

Antes de iniciar as aquisições dos sinais no corpo-de-prova sem o carregamento, fez-se o cálculo com a fórmula da tensão de flexão, baseada no limite de escoamento do material em estudo, sendo assim:

$$TF = \sigma = \frac{FLc}{4J} \quad (18)$$

Onde:

- F, é a carga aplicada;
- L, é a distância entre os apoios no valor de 827 mm;
- h, é a altura no valor de 107 mm;
- b, é a largura no valor de 95 mm;
- c, é  $\frac{h}{2}$ ;
- J, é o momento de inércia para corpos de seção retangular no valor de 9698257,08 mm<sup>4</sup>;

O aço 20 MnMoNi 55 possui um limite de escoamento à temperatura ambiente no valor de 50 Kgf/mm<sup>2</sup> (490 MPa) conforme literatura [18]. Com esta informação obtemos um carregamento máximo para este ensaio no valor de 42.000 kg, que proporciona uma tensão no valor de 48 Kgf/mm<sup>2</sup> (96% do limite de escoamento). Utilizou-se, também, o valor de carregamento de 28.000 kg, que proporciona uma tensão no valor de 32 Kgf/mm<sup>2</sup> (64% do limite de escoamento). Então, definiu-se por fazer neste ensaio de flexão dois carregamentos contínuos, sendo o primeiro de 28.000 kg e o segundo de 42.000 kg, para confirmar o comportamento do material nestes dois carregamentos e seus respectivos resultados.

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS, AS ANÁLISES E INTERPRETAÇÕES PERTINENTES**

### **4.1 PRIMEIRA EXPERIÊNCIA – AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS**

#### **4.1.1 RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA ETAPA – SOBRE AQUISIÇÃO DE SINAIS**

A seguir, na tabela 4.1, serão mostrados os dados obtidos nos 6 dias de ensaios da primeira etapa deste trabalho, conforme as metodologias explicadas no item 3.1.5.1.:

**Tabela 4.1 – Dados obtidos nos 6 dias de ensaios da 1ª etapa.**

<b>METODOLOGIA</b>	<b>CONJUNTO DE DADOS DIA (DIREÇÃO)</b>	<b>% DADOS DISPERSOS</b>	<b>% DADOS VÁLIDOS</b>	<b>TEMPO MÉDIO (ns)</b>	<b>VARIAÇÃO DO TEMPO (ns)</b>	<b>TEMPERATURA MÉDIA (°C)</b>	<b>VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (°C)</b>
"CONTÍNUA"	1º DIA (LONGITUDINAL)	28	72	5.826	1	25,41	1,1
"CONTÍNUA"	2º DIA (LONGITUDINAL)	36	64	5.826	1	24,35	0,6
"CONTÍNUA"	3º DIA (LONGITUDINAL)	16	84	5.825	6	23,87	0,1
"CONTÍNUA"	4º DIA (LONGITUDINAL)	34	66	5.826	1	25,39	0,3
"CONTÍNUA"	5º DIA (LONGITUDINAL)	18	82	5.826	1	24,88	0,2
"PAR-A-PAR"	6º DIA (LONGITUDINAL)	6	94	5.826	6	23,32	0,0
<b>METODOLOGIA</b>	<b>CONJUNTO DE DADOS DIA (DIREÇÃO)</b>	<b>% DADOS DISPERSOS</b>	<b>% DADOS VÁLIDOS</b>	<b>TEMPO MÉDIO (ns)</b>	<b>VARIAÇÃO DO TEMPO (ns)</b>	<b>TEMPERATURA MÉDIA (°C)</b>	<b>VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (°C)</b>
"CONTÍNUA"	1º DIA (TRANSVERSAL)	14	86	5.844	3	25,58	0,7
"CONTÍNUA"	2º DIA (TRANSVERSAL)	24	76	5.844	1	24,02	0,2
"CONTÍNUA"	3º DIA (TRANSVERSAL)	20	80	5.839	6	23,74	0,1
"CONTÍNUA"	4º DIA (TRANSVERSAL)	30	70	5.844	3	25,20	0,2
"CONTÍNUA"	5º DIA (TRANSVERSAL)	4	96	5.844	1	24,82	0,0
"PAR-A-PAR"	6º DIA (TRANSVERSAL)	12	88	5.838	6	23,23	0,2

A seguir, será mostrado no gráfico da figura 4.1, os valores das médias dos tempos de percursos das ondas ultrassônicas obtidos, em cada dia com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente e transversalmente ao corpo-de-prova:

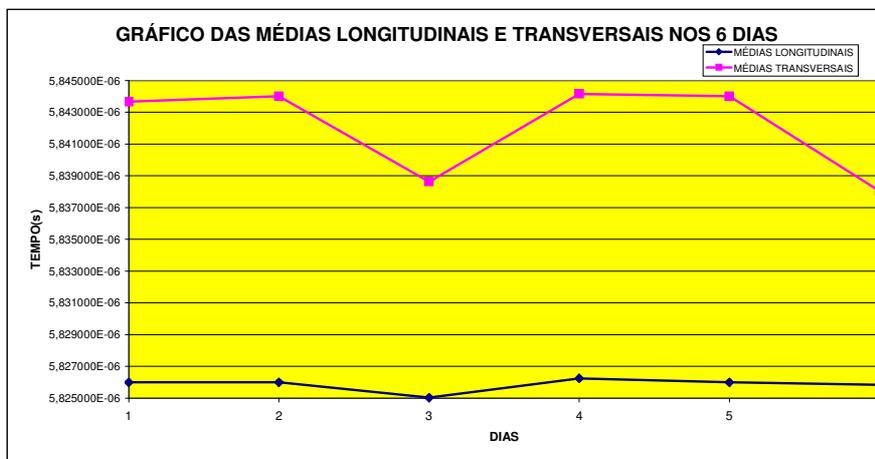


Figura 4.1 – Gráfico das médias longitudinais e transversais nos 6 dias.

Com a obtenção dos valores de todos os tempos de percurso dos sinais ultrassônicos com a direção da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente e transversalmente ao corpo-de-prova, foram obtidas as birrefringências. E seus comportamentos serão mostrados no gráfico da figura 4.2 e suas médias diárias serão mostradas na tabela 4.2.

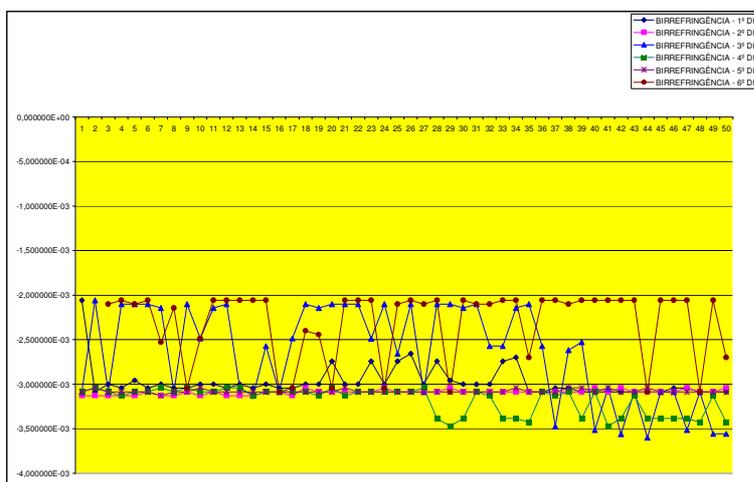


Figura 4.2 – Gráfico com o comportamento das birrefringências e suas médias diárias.

Tabela 4.2 -Valores das médias das birrefringências nos 6 dias.

	BIRREFRINGÊNCIA - 1º DIA	BIRREFRINGÊNCIA - 2º DIA	BIRREFRINGÊNCIA - 3º DIA	BIRREFRINGÊNCIA - 4º DIA	BIRREFRINGÊNCIA - 5º DIA	BIRREFRINGÊNCIA - 6º DIA
MÉDIAS	-2,972816E-03	-3,089156E-03	-2,632024E-03	-3,181407E-03	-3,078820E-03	-2,294371E-03

#### 4.1.2 RESULTADOS OBTIDOS NA SEGUNDA ETAPA – SOBRE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

A seguir, na tabela 4.3, serão mostradas os dados obtidos nos 2 dias de ensaios da segunda etapa:

Tabela 4.3 – Dados obtidos nos 2 dias de ensaios da 2ª etapa.

CONJUNTO DE DADOS TEMPERATURA (DIREÇÃO)	% DADOS DISPERSOS	% DADOS VÁLIDOS	TEMPO MÉDIO (ns)	VARIAÇÃO DO TEMPO (ns)
19,8°C (LONGITUDINAL)	20	80	5.832	1
20,8°C (LONGITUDINAL)	30	70	5.838	5
21,8°C (LONGITUDINAL)	0	100	5.838	0
22,8°C (LONGITUDINAL)	0	100	5.838	0
23,8°C (LONGITUDINAL)	10	90	5.838	1
24,8°C (LONGITUDINAL)	10	90	5.838	1
25,8°C (LONGITUDINAL)	10	90	5.838	1

CONJUNTO DE DADOS TEMPERATURA (DIREÇÃO)	% DADOS DISPERSOS	% DADOS VÁLIDOS	TEMPO MÉDIO (ns)	VARIAÇÃO DO TEMPO (ns)
20,3°C (TRANSVERSAL)	30	70	5.868	1
20,8°C (TRANSVERSAL)	0	100	5.868	0
21,8°C (TRANSVERSAL)	10	90	5.868	1
22,8°C (TRANSVERSAL)	20	80	5.868	1
23,8°C (TRANSVERSAL)	20	80	5.868	1
24,8°C (TRANSVERSAL)	40	60	5.868	1
25,8°C (TRANSVERSAL)	40	60	5.862	6

A seguir, serão mostrados nos gráficos da figura 4.3 e da figura 4.4, os valores dos tempos (longitudinal) médios obtidos x temperaturas, e os valores dos tempos (transversal) médios x temperaturas, respectivamente, dos percursos dos sinais ultrassônicos com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente e transversalmente ao corpo-de-prova:

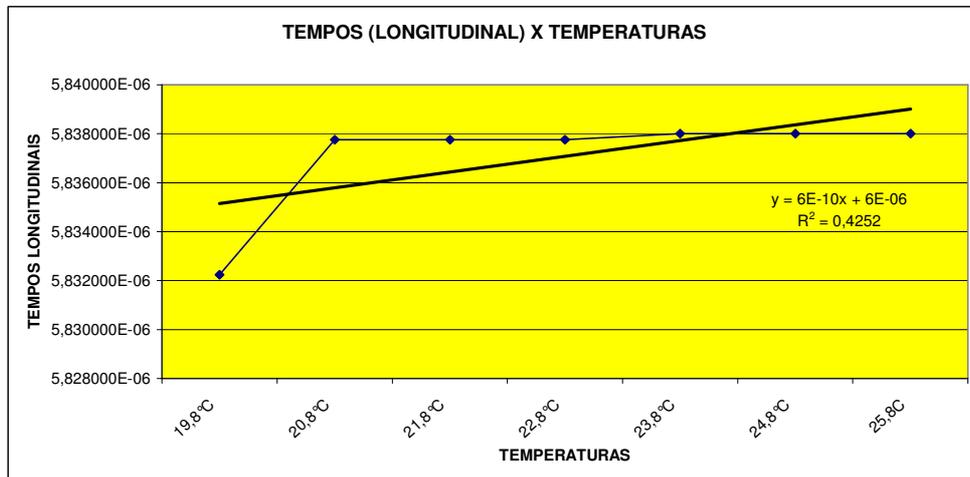


Figura 4.3 – Tempos (longitudinal) x temperaturas.

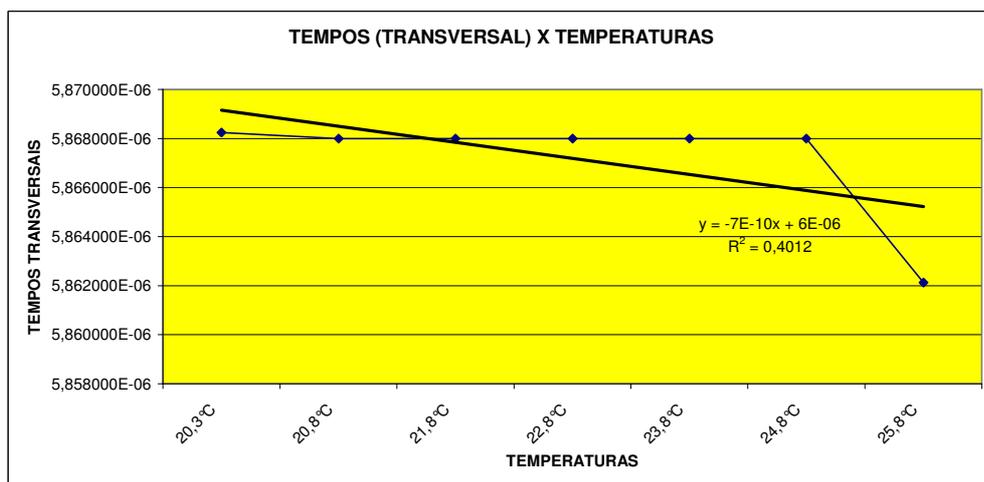


Figura 4.4 – Tempos (transversal) x temperaturas.

### **4.1.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA**

#### **4.1.3.1 PRIMEIRA ETAPA – SOBRE AQUISIÇÕES DE SINAIS**

Cada conjunto de dados mostrado na tabela 4.1 é formado pelo tempo dos 50 sinais ultrassônicos obtidos com a direção de polarização da onda ultrassônica do transdutor alinhada longitudinalmente ou transversalmente ao corpo-de-prova, nas duas metodologias (“Contínua” e “Par-a-par”) em todos os dias.

A análise dos conjuntos de dados obtidos na tabela 4.1 foi realizada através de um desvio padrão, que mede a dispersão dos valores individuais em relação à média de cada conjunto de dados, permitindo dizer se os valores estão mais próximos (válidos -dentro do desvio padrão) ou mais distantes (dispersos – fora do desvio padrão) para uma mesma média. Para determinar o tempo médio dos sinais ultrassônicos em cada conjunto de dados nas duas metodologias (“Contínua” e “Par-a-par”) em todos os dias nas duas direções de polarização, utilizou-se apenas os valores dos dados válidos. E entre estes dados válidos registrou-se a variação entre o maior e o menor tempo obtidos em cada conjunto de dados.

Durante a aquisição dos sinais ultrassônicos para cada conjunto de dados registrou-se também a temperatura média e a variação entre a maior e a menor temperatura para cada conjunto de dados nas duas metodologias (“Contínua” e “Par-a-par”) em todos os dias nas duas direções de polarização.

Analisando as duas metodologias (“Contínua” e “Par-a-par”) em todos os dias nas duas direções de polarização, verificou-se que o menor percentual dos dados válidos foi de 64% do total e o maior percentual dos dados válidos foi de 96%;

Na análise dos tempos médios obtidos através dos dados válidos em cada conjunto de dados na metodologia “Contínua” nas duas direções de polarização, verificou-se no conjunto de dados obtidos no 3º dia de ensaio, os valores dos tempos médios são os mesmos. E que a variação entre o maior e o menor tempo obtidos em cada conjunto de dados neste 3º dia de ensaio foi a maior, 6 ns, em relação aos conjuntos de dados obtidos nos outros dias. Pode-se descartar os resultados obtidos no 3º dia.

Ao analisar as temperaturas médias obtidas em cada conjunto de dados nas duas metodologias (“Contínua” e “Par-a-Par”) em todos os dias nas duas direções de polarização e comparando a maior e a menor temperatura média entre elas, verifica-se que esta diferença não ultrapassou 2,35 °C.

Na análise do tempo médio obtido através dos dados válidos no conjunto de dados na metodologia “Par-a-par” na direção de polarização longitudinal à peça, o valor encontrado

foi igual ao valor encontrado através da metodologia “Contínua”. Já na direção de polarização transversal à peça o valor encontrado para o tempo médio foi 6ns menor comparando-se com o tempo médio obtido na metodologia “Contínua”. A variação entre o maior e o menor tempo obtidos em cada conjunto de dados nas duas direções de polarização foi de 6 ns.

Ao analisar a tabela 4.2, verifica-se que as birrefringências médias obtidas através de 50 birrefringências em cada conjunto de dados, quer dizer sem o uso do desvio padrão, pela metodologia “Contínua” em todos os dias possuem valores muito próximos, exceto a birrefringência obtida no 3º dia de ensaio, que já fora descartado para análise dos resultados. E quanto a birrefringência média obtida através da metodologia “Par-a-par”, verifica-se um valor mais distante em relação as birrefringências médias obtidas na metodologia “Contínua”.

Então, ao se comparar as duas metodologias para a aquisição dos sinais ultrassônicos, a “Contínua” (nos 5 primeiros dias) e a “Par-a-par” (no sexto dia), verifica-se que devido a maior facilidade operacional no manuseio do transdutor e rapidez durante a obtenção dos tempos ultrassônicos, e também, a uma menor dispersão dos resultados, conclui-se que a 1ª metodologia (“Contínua”) é melhor e mais indicada em relação à 2ª metodologia (“Par-a-par”) para este trabalho.

#### **4.1.3.2 SEGUNDA ETAPA – SOBRE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA**

Cada conjunto de dados mostrado na tabela 4.3 é formado pelo tempos dos 10 sinais ultrassônicos obtidos com a direção de polarização da onda ultrassônica do transdutor alinhada longitudinalmente ou transversalmente ao corpo-de-prova para cada temperatura analisada.

A análise dos conjuntos de dados obtidos na tabela 4.3 foi realizada através de um desvio padrão, que mede a dispersão dos valores individuais em relação à média de cada conjunto de dados, permitindo dizer se os valores estão mais próximos (válidos -dentro do desvio padrão) ou mais distantes (dispersos – fora do desvio padrão) para uma mesma média. Para determinar o tempo médio dos sinais ultrassônicos em cada conjunto de dados nas duas direções de polarização, utilizou-se apenas os valores dos dados válidos. E entre estes dados válidos registrou-se a variação entre o maior e o menor tempo obtidos em cada conjunto de dados.

Na segunda etapa deste trabalho, já se utilizando da 1ª metodologia definida na 1ª etapa, através da comparação dos dados obtidos nas diferentes temperaturas estudadas conforme mostrado na tabela 4.3, verificou-se que:

Em todos os dias, o percentual dos dados válidos foi superior a 60% do total;

Em relação à variação entre o maior e o menor tempo obtidos, na direção de polarização longitudinal, excluindo o resultado obtido a 20,8°C, não ultrapassou 1 ns. E esta variação na direção de polarização transversal, excluindo o resultado obtido a 25,8°C, também não foi superior a 1 ns;

Analisando os resultados dos tempos médios dos sinais ultrassônicos obtidos em cada conjunto de dados na direção de polarização longitudinal, excetuando o resultado obtido a 19,8°C, que foi 6 ns menor que os valores obtidos nos outros conjuntos de dados, foram praticamente iguais, nas outras temperaturas. Já, os valores dos tempos médios dos sinais ultrassônicos obtidos em cada conjunto de dados na direção de polarização transversal foram praticamente iguais, excetuando o resultado obtido a 25,8°C, que foi 6 ns menor em relação aos outros resultados.

Então, conclui-se que nas faixas de temperaturas estudadas (onde a variação maior foi de 5°C na direção de polarização longitudinal e de 6°C na direção de polarização transversal), não houve influência desta variação de temperatura nos resultados obtidos.

## 4.2 SEGUNDA EXPERIÊNCIA – ESTUDO ACUSTOELÁSTICO DO AÇO 20 MnMoNi 55 ATRAVÉS DA METODOLOGIA SELECIONADA

Conforme a metodologia descrita no item 3.2.7, isto é , com o transdutor de 1 MHz, os resultados obtidos na aquisição dos tempos longitudinais (tempos de propagação da onda ultrassônica polarizada na direção longitudinal) e transversais (tempos de propagação da onda ultrassônica polarizada na direção transversal) do aço 20 MnMoNi 55 são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dados obtidos através da aquisição dos tempos longitudinais e transversais na peça do aço 20 MnMoNi 55.

POSICÃO E MEDIDA	TEMPOS LONGITUDINAIS				TEMPOS TRANSVERSAIS			
	% DADOS DISPERSOS	% DADOS VALIDOS	TEMPOS MÉDIO (ns)	VARIÇÃO DO TEMPO (ns)	% DADOS DISPERSOS	% DOS VALIDOS	TEMPOS MÉDIO (ns)	VARIÇÃO DO TEMPO (ns)
1A - 1ª MEDIDA	0	100	74.700	0	0	100	74.760	0
1A - 2ª MEDIDA	10	90	74.769	60	0	100	74.850	0
1A - 3ª MEDIDA	0	100	74.755	30	20	80	74.826	30
20A - 1ª MEDIDA	10	90	74.613	30	30	70	74.703	60
20A - 2ª MEDIDA	20	80	74.722	30	10	90	74.761	10
20A - 3ª MEDIDA	10	90	74.727	30	20	80	74.763	50
40A - 1ª MEDIDA	10	90	74.697	30	10	90	74.733	30
40A - 2ª MEDIDA	20	80	74.694	0	0	100	74.730	0
40A - 3ª MEDIDA	10	90	74.667	30	20	80	74.707	30
1D - 1ª MEDIDA	20	80	74.616	30	10	90	74.697	30
1D - 2ª MEDIDA	0	100	74.610	0	10	90	74.697	30
1D - 3ª MEDIDA	10	90	74.614	30	40	60	74.688	30
20D - 1ª MEDIDA	0	100	74.580	0	0	100	74.640	0
20D - 2ª MEDIDA	0	100	74.580	0	0	100	74.640	0
20D - 3ª MEDIDA	10	90	74.577	30	0	100	74.640	0
40D - 1ª MEDIDA	0	100	74.610	0	10	90	74.673	30
40D - 2ª MEDIDA	0	100	74.610	0	0	100	74.670	30
40D - 3ª MEDIDA	0	100	74.610	0	0	100	74.670	30
1H - 1ª MEDIDA	20	80	54.903	24.520	10	90	74.607	30
1H - 2ª MEDIDA	30	70	74.499	30	30	70	74.601	30
1H - 3ª MEDIDA	0	100	74.490	0	10	90	74.582	20
20H - 1ª MEDIDA	20	80	74.400	30	10	90	74.493	30
20H - 2ª MEDIDA	10	90	74.403	30	20	80	74.484	30
20H - 3ª MEDIDA	0	100	74.400	0	0	100	74.490	0
40H - 1ª MEDIDA	20	80	74.394	30	30	70	74.499	30
40H - 2ª MEDIDA	0	100	74.400	0	0	100	74.490	0
40H - 3ª MEDIDA	0	100	74.400	0	0	100	74.490	0
1A - 50 MEDIDAS	23	77	74.776,20	30	5	95	74.853	30
20D - 50 MEDIDAS	10	90	74.573,60	30	0	100	74.640	0
40H - 50	0	100	74.370	0	1	99	74.460,20	10

#### **4.2.1 ANÁLISE DOS TEMPOS DE PERCURSO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS CISALHANTES NA PEÇA DO AÇO 20 MnMoNi 55**

Analisando os resultados apresentados na tabela 4.4, foi verificado que:

Foi descartada a 1ª medida longitudinal do ponto 1H, devido ao resultado obtido indicar um possível erro de aquisição dos sinais.

Em todos os tempos obtidos foram aplicadas suas respectivas médias e desvios padrões para tornar os resultados mais precisos.

Principalmente, nas aquisições das medidas contendo 10 sinais ao analisar o percentual dos dados dispersos e dados válidos, foram descartados no máximo 30% dos dados obtidos em cada conjunto de sinais, seja na longitudinal ou na transversal. E a variação da leitura dos tempos longitudinais e transversais em cada seqüência não foi superior a 30 ns.

Constatou-se também, que a variação das leituras dos tempos longitudinais e transversais em cada seqüência de 10 sinais em cada ponto não ultrapassou 60 ns. E a diferença entre os tempos médios em cada ponto, na longitudinal foi de 114 ns no ponto 20 A e na transversal foi de 90 ns no ponto 1A.

Já nas aquisições com medidas contendo 50 sinais, em que foi feito apenas um conjunto de medidas em cada ponto, analisando os percentuais dos dados dispersos e dados válidos, descartou-se apenas 23% na longitudinal do ponto 1A, enquanto na transversal o descarte não foi superior a 5%.

Segundo Bittencourt [13], a onda cisalhante tem tempo mínimo de percurso, isto é, velocidade máxima, quando a sua polarização coincide com a orientação cristalográfica preferencial no aço. Nesse material o tempo mínimo de percurso ocorre quando a polarização está na direção longitudinal da peça, isto é, a onda cisalhante consegue perceber a orientação cristalográfica, apesar deste aço ter sido provavelmente forjado e não laminado, mostrando a sensibilidade desta técnica.

A diferença entre a média das médias em cada ponto no conjunto de 10 sinais e o conjunto de 50 sinais, conforme metodologia explicada no item 3.2.7, indicado na tabela 4.5, não foi superior a 35 ns na longitudinal e 41 ns na transversal.

Tabela 4.5 – Comparação das médias dos tempos com 10 sinais e 50 sinais.

<b>PONTOS</b>	<b>DIREÇÕES</b>	<b>10 SINAIS (ns)</b>	<b>50 SINAIS (ns)</b>	<b>DIFERENÇA (ns)</b>
<b>1A</b>	<i>TEMPO LONGITUDINAL</i>	<b>74.741</b>	<b>74.776</b>	<b>35</b>
	<i>TEMPO TRANSVERSAL</i>	<b>74.812</b>	<b>74.853</b>	<b>41</b>
<b>20 D</b>	<i>TEMPO LONGITUDINAL</i>	<b>74.579</b>	<b>74.573</b>	<b>6</b>
	<i>TEMPO TRANSVERSAL</i>	<b>74.640</b>	<b>74.640</b>	<b>0</b>
<b>40 H</b>	<i>TEMPO LONGITUDINAL</i>	<b>74.398</b>	<b>74.370</b>	<b>28</b>
	<i>TEMPO TRANSVERSAL</i>	<b>74.493</b>	<b>74.460</b>	<b>33</b>

Analisando estes resultados, foi possível decidir pela aquisição de sinais nos pontos através dos conjuntos de medidas com 10 sinais, que além de ser mais rápido também apresenta valores muito próximos dos conjuntos de medidas com 50 sinais, pois apresenta uma diferença menor que 0,06% na comparação dos respectivos valores.

#### **4.2.2 LEVANTAMENTO DAS BIRREFRINGÊNCIAS ACÚSTICAS NA PEÇA DE AÇO 20 MnMoNi 55**

Assim, com a metodologia definida para executar a varredura em toda a área da superfície definida para o ensaio ultrassônico mantendo suas dimensões, foi feito um teste com a utilização de um transdutor normal com frequência de 0,5 MHz e com  $\varnothing_{\text{ext}}$  igual a 36mm. E o resultado apresentado foi de uma visualização muito melhor dos dois primeiros ecos comparando com o transdutor de frequência de 1MHz e  $\varnothing_{\text{ext}}$  de 18 mm, conforme descrito no item 3.2.7. Assim, com o  $\varnothing_{\text{ext}}$  maior só seria possível uma varredura com um número menor de pontos.

Então, com este novo transdutor de 0,5 MHz cada ponto abrangeria 4 pontos da configuração anterior (figura 3.7), assim, possibilitando 4 linhas na direção longitudinal da peça e 20 colunas na direção transversal da peça, totalizando 80 pontos para aquisição de sinais. Mantendo-se a nomenclatura de cada ponto, com um número seguido de uma letra (1 A, 10 B, 20 D), conforme a Figura 4.5, sendo esta a nova e última configuração usada para o transdutor de 0,5 MHz.

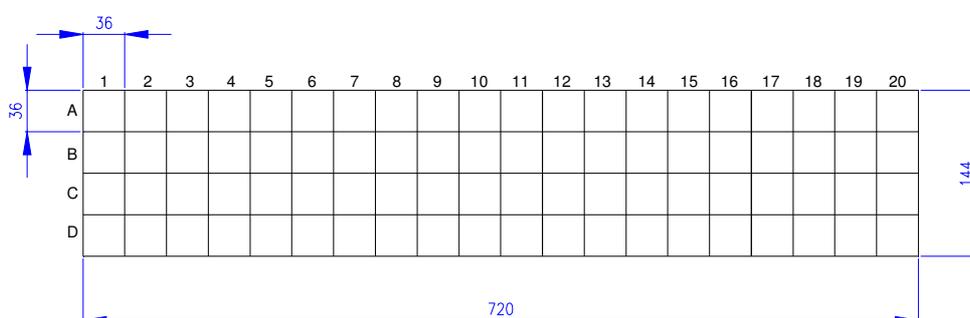


Figura 4.5 – Distribuição e dimensionamento dos pontos para aquisição de dados – 80 pontos (dimensões em mm).

Iniciou-se, assim, a aquisição das medidas de tempo das ondas ultrassônicas nos 80 pontos determinados para o ensaio de ultrassom pelo método “Contínuo”, sendo obtidos 10 sinais ultrassônicos contínuos e seqüenciais, isto é, sem girar o transdutor, com a direção da polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente à peça (números ímpares). E, a seguir, são obtidos mais 10 sinais ultrassônicos, também contínuos e seqüenciais, agora, girando-se em 90° o transdutor, com a direção de polarização da onda ultrassônica alinhada transversalmente à peça (números pares).

Este procedimento foi feito como dito acima, em cada um dos 80 pontos.

Como já foi mencionado anteriormente no item 3.1.3, foi utilizado um osciloscópio marca Tektronix, modelo TDS 3032 B cuja a taxa de amostragem pode chegar a 300 MHz, e a interpolação não foi utilizada para o processamento matemático no programa “Chronos”.

A diferença em relação às aquisições de dados anteriores, é que o objetivo principal agora é verificar o grau de anisotropia do material, utilizando a técnica da birrefringência acústica, esta que é obtida através da diferença relativa entre os tempos de percurso da onda ultrassônica cisalhante normal à espessura da peça.

Na tabela 4.6, são apresentadas as médias dos tempos longitudinais em cada ponto.

Tabela 4.6 – Médias dos tempos longitudinais nos 80 pontos.

<b>MÉDIAS DOS TEMPOS LONGITUDINAIS (ns)</b>				
<b>POSICÕES</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
1	74.742	74.611	74.544	74.505
2	74.490	74.610	74.568	74.439
3	74.535	74.535	74.460	74.430
4	74.577	74.535	74.469	74.379
5	74.670	74.583	74.590	74.493
6	74.694	74.619	74.566	74.419
7	74.667	74.608	74.569	74.462
8	74.631	74.570	74.538	74.471
9	74.615	74.514	74.446	74.376
10	74.639	74.526	74.454	74.409
11	74.700	74.511	74.478	74.384
12	74.668	74.516	74.450	74.403
13	74.648	74.505	74.487	74.353
14	74.621	74.508	74.500	74.447
15	74.567	74.452	74.452	74.274
16	74.577	74.445	74.425	74.262
17	74.519	74.483	74.413	74.316
18	74.637	74.543	74.433	74.320
19	74.618	74.554	74.449	74.256
20	74.597	74.522	74.471	74.317

Na tabela 4.7, são apresentadas as médias dos tempos transversais em cada ponto.

Tabela 4.7 – Médias dos tempos transversais nos 80 pontos.

<b>MÉDIAS DOS TEMPOS TRANSVERSAIS (ns)</b>				
<b>POSICÕES</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
1	74.766	74.692	74.629	74.559
2	74.613	74.697	74.640	74.550
3	74.610	74.610	74.523	74.502
4	74.658	74.607	74.538	74.466
5	74.729	74.658	74.687	74.582
6	74.760	74.697	74.649	74.527
7	74.724	74.657	74.619	74.520
8	74.702	74.649	74.610	74.562
9	74.700	74.577	74.520	74.446
10	74.699	74.582	74.541	74.476
11	74.757	74.588	74.543	74.486
12	74.708	74.574	74.518	74.481
13	74.680	74.545	74.566	74.430
14	74.685	74.581	74.580	74.529
15	74.619	74.518	74.511	74.354
16	74.621	74.497	74.491	74.370
17	74.603	74.517	74.491	74.395
18	74.694	74.595	74.519	74.392
19	74.687	74.610	74.510	74.349
20	74.654	74.583	74.528	74.410

Foi verificado nestas duas últimas tabelas, que em cada ponto sempre a média dos tempos longitudinais foi menor (velocidade maior) que a média dos tempos transversais (velocidade menor), nesta peça forjada de aço 20 MnMoNi 55. Isto mostra a presença de uma anisotropia acústica no material.

Na tabela 4.8, são apresentadas as diferenças entre as médias dos tempos longitudinais e transversais no mesmo ponto.

Tabela 4.8 – Diferença entre as médias dos tempos long. e transv. no mesmo ponto (ns).

<b>DIFERENÇA ENTRE AS MÉDIAS DOS TEMPOS LONG. E TRANSV. NO MESMO PONTO (ns)</b>				
<b>POSIÇÕES</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>1</b>	<b>24</b>	<b>81</b>	<b>79</b>	<b>69</b>
<b>2</b>	<b>123</b>	<b>87</b>	<b>60</b>	<b>120</b>
<b>3</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>63</b>	<b>72</b>
<b>4</b>	<b>81</b>	<b>72</b>	<b>48</b>	<b>96</b>
<b>5</b>	<b>59</b>	<b>75</b>	<b>107</b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>66</b>	<b>78</b>	<b>69</b>	<b>97</b>
<b>7</b>	<b>57</b>	<b>49</b>	<b>39</b>	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>71</b>	<b>79</b>	<b>90</b>	<b>102</b>
<b>9</b>	<b>85</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>76</b>
<b>10</b>	<b>60</b>	<b>56</b>	<b>81</b>	<b>76</b>
<b>11</b>	<b>57</b>	<b>77</b>	<b>83</b>	<b>106</b>
<b>12</b>	<b>40</b>	<b>58</b>	<b>88</b>	<b>71</b>
<b>13</b>	<b>32</b>	<b>40</b>	<b>76</b>	<b>70</b>
<b>14</b>	<b>64</b>	<b>73</b>	<b>90</b>	<b>89</b>
<b>15</b>	<b>52</b>	<b>66</b>	<b>71</b>	<b>104</b>
<b>16</b>	<b>44</b>	<b>52</b>	<b>71</b>	<b>120</b>
<b>17</b>	<b>84</b>	<b>34</b>	<b>81</b>	<b>85</b>
<b>18</b>	<b>57</b>	<b>52</b>	<b>89</b>	<b>52</b>
<b>19</b>	<b>69</b>	<b>56</b>	<b>80</b>	<b>89</b>
<b>20</b>	<b>57</b>	<b>61</b>	<b>58</b>	<b>80</b>

Como é mostrado na tabela 4.8, a diferença entre as médias dos tempos longitudinais e transversais em cada ponto não foi superior 123 ns. E o valor da média entre essas médias foi de 72 ns.

Na tabela 4.9, são apresentadas as diferenças entre o maior e o menor tempo obtidos entre os 10 tempos longitudinais num mesmo ponto.

Tabela 4.9 - Diferença entre o maior e o menor tempo entre os 10 tempos long. num mesmo ponto(ns).

<b>DIFERENÇA ENTRE O MAIOR E O MENOR SINAL ENTRE OS 10 TEMPOS LOG. NO MESMO PONTO(ns)</b>				
<b>POSICÕES</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>1</b>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>50</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>30</b>	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>10</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
<b>11</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>12</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>30</b>	<b>40</b>
<b>13</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>60</b>
<b>14</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>30</b>
<b>15</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>50</b>
<b>16</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>17</b>	<b>70</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>18</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>30</b>
<b>19</b>	<b>40</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>20</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>50</b>

Na tabela 4.10, são apresentadas as diferenças entre o maior e o menor tempo entre os 10 tempos transversais num mesmo ponto.

Tabela 4.10 - Diferença entre o maior e o menor tempo entre os 10 tempos transv. num mesmo ponto(ns).

<b>DIFERENÇA ENTRE O MAIOR E O MENOR SINAL ENTRE OS 10 TEMPOS TRANSV. NO MESMO PONTO(ns)</b>				
<b>POSICÕES</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>1</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>2</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>60</b>
<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>0</b>
<b>8</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
<b>9</b>	<b>50</b>	<b>40</b>	<b>20</b>	<b>40</b>
<b>10</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>30</b>	<b>50</b>
<b>11</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
<b>12</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>30</b>
<b>13</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>30</b>	<b>60</b>
<b>14</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>0</b>	<b>50</b>
<b>15</b>	<b>40</b>	<b>10</b>	<b>40</b>	<b>60</b>
<b>16</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
<b>17</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>40</b>
<b>18</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>60</b>
<b>19</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
<b>20</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>40</b>	<b>40</b>

Como se vê nas tabelas 4.9 e 4.10, verificou-se que a maior diferença entre o menor e o maior tempo obtidos no mesmo ponto, tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal com o cabeçote sem sofrer qualquer movimentação, chegou a ser de 70 ns. E, na maioria dos sinais, os tempos num mesmo ponto variaram na escala de 30 ns entre eles. Essa variação, possivelmente, pode ser ligada à possíveis erros do sistema ultrassônico.

E ainda, existe a possibilidade, entretanto, da espessura definida como 120 mm ao longo da extensão da peça, devido aos processos de fabricação (forjamento, corte, usinagem, etc) sofrer variações da espessura indicada, influenciando nos valores dos tempos longitudinais (tempos de propagação da onda ultrassônica

polarizada na direção longitudinal da peça de aço 20 MnMoNi 55) e tempos transversais (tempos de propagação da onda ultrassônica polarizada na direção transversal da peça de aço 20 MnMoNi 55) ao longo da peça, em alguns nanosegundos (ns). Assim, foram obtidas as birrefringências em cada ponto que podem ser consideradas os tempos de percurso “Normalizados”. Na tabela 4.11, são apresentadas as médias das birrefringências em cada ponto, sem o uso do desvio padrão.

Tabela 4.11 – Médias das birrefringências nos 80 pontos.

<b>MÉDIAS DAS BIRREFRINGÊNCIAS</b>				
<b>POSICÕES</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
1	-3,2106E-04	-1,0850E-03	-1,1396E-03	-7,2452E-04
2	-1,6499E-03	-1,1654E-03	-9,6512E-04	-1,4900E-03
3	-9,6550E-04	-1,0058E-03	-8,4573E-04	-9,6688E-04
4	-1,0855E-03	-9,6554E-04	-9,2613E-04	-1,1690E-03
5	-7,8983E-04	-1,0051E-03	-1,2996E-03	-1,1940E-03
6	-8,8322E-04	-1,0448E-03	-1,1125E-03	-1,4502E-03
7	-7,8989E-04	-6,5654E-04	-6,7030E-04	-7,7863E-04
8	-9,5090E-04	-1,0589E-03	-9,6550E-04	-1,2212E-03
9	-1,1386E-03	-8,4516E-04	-9,9353E-04	-9,4071E-04
10	-8,0355E-04	-7,5113E-04	-1,1678E-03	-9,0001E-04
11	-7,6275E-04	-1,0329E-03	-8,7237E-04	-1,3703E-03
12	-5,3555E-04	-7,7807E-04	-9,1292E-04	-1,0478E-03
13	-4,2860E-04	-5,3673E-04	-1,0600E-03	-1,0351E-03
14	-8,5731E-04	-9,7929E-04	-1,0733E-03	-1,1008E-03
15	-6,9711E-04	-8,8609E-04	-7,9213E-04	-1,0765E-03
16	-5,8981E-04	-6,9826E-04	-8,8641E-04	-1,4533E-03
17	-1,1266E-03	-4,5637E-04	-1,0477E-03	-1,0625E-03
18	-7,6340E-04	-6,9735E-04	-1,1548E-03	-9,6830E-04
19	-9,2429E-04	-7,5085E-04	-8,1902E-04	-1,2517E-03
20	-7,6382E-04	-8,1822E-04	-7,6510E-04	-1,2506E-03

Graficamente a distribuição das birrefringências nos 80 pontos é mostrada na figura 4.6.

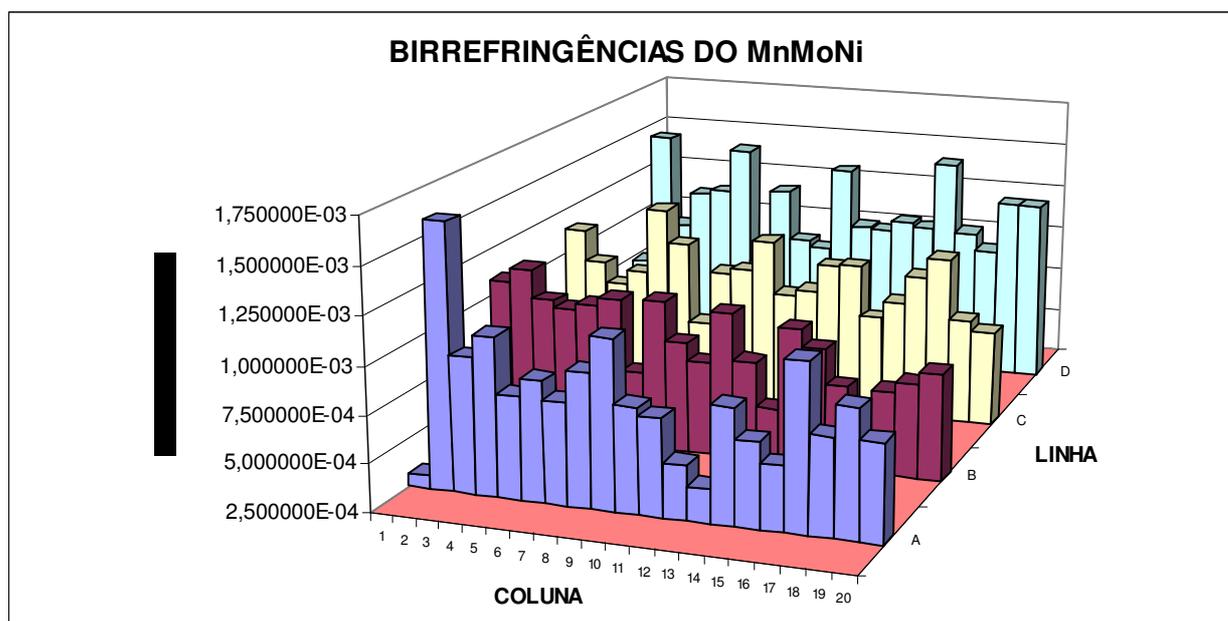


Figura 4.6 – Gráfico da distribuição das birrefringências ao longo da peça.

Com este resultado apresentado, foi necessário o uso da estatística para ajudar na interpretação desses números e ponderar sobre a homogeneidade deste material relativa a sua birrefringência acústica.

#### 4.2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS BIRREFRINGÊNCIAS ACÚSTICAS

O teste de hipóteses é o uso dos dados para verificar afirmações sobre parâmetros da população. Enfim, os testes de hipóteses são um meio de decidir qual dos resultados é o correto dentro de um erro tolerável e são utilizados para julgar se existem diferenças significativas dentro de um grau de confiança  $P$ , ou incerteza  $\alpha$ , entre dois ou mais resultados de medidas.

As alternativas de testes são várias, englobando os resultados comparativos de (amostra x população), (amostra x amostra), para os seus valores médios e suas variâncias.

Além destas alternativas, existe condição do detalhamento do teste, no sentido de se a igualdade dos valores em questão possui ou não uma causa ou direção.

Basicamente, existem dois tipos de hipóteses:

- 1 – Hipótese Nula,  $H_0$ , onde se faz o teste se dois resultados são iguais, dentro de um determinado nível de confiança (ou grau de incerteza);
- 2 – Hipótese Alternativa,  $H_1$ , onde se faz o teste se dois resultados são diferentes, dentro de um determinado nível de confiança (ou grau de incerteza)

O teste de hipótese deve ser desenvolvido com a probabilidade de se alcançar uma conclusão errônea. A hipótese nula é a hipótese a ser testada. A rejeição da hipótese nula sempre leva a aceitação da hipótese alternativa. O teste de hipóteses envolve uma ou mais variáveis aleatórias, o cálculo do teste estatístico dos dados da amostra e usa o teste estatístico para tomar a decisão a respeito da hipótese nula. O teste de hipótese pode levar a dois tipos de erros. O primeiro conhecido como erro do tipo I acontece quando a hipótese nula é rejeitada quando na verdade ela é verdadeira. Este tipo de erro também é conhecido como erro  $\alpha$  ou nível de significância. O segundo tipo de erro ocorre quando se assume que não é possível rejeitar a hipótese nula, e na verdade, ela é falsa. Este erro é conhecido como erro do tipo II, denotado por  $\beta$ . [15]

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

1. Identificar o parâmetro de interesse dentro do contexto do problema;
2. Estabelecer a hipótese nula,  $H_0$ ;
3. Especificar uma hipótese alternativa,  $H_1$ ;
4. Escolher o nível de significância,  $\alpha$ ;
5. Determinar o teste estatístico apropriado;
6. Estabelecer a região de rejeição para o teste;
7. Calcular as quantidades necessárias das amostras e substituí-las na equação do teste estatístico, e então calcular o valor do teste;

## 8. Decidir se $H_0$ deve ou não ser rejeitada.

Neste trabalho, através do uso do programa análise de dados do Microsoft Excel, com as médias e desvios padrões dos resultados obtidos das birrefringências acústicas iniciais ( $B_0$ ), foi necessário o uso da ferramenta estatística de análise ANOVA: FATOR ÚNICO, que realiza a análise de variância, procedimento estatístico de teste de hipóteses para comparação das médias de duas ou mais populações para analisar os valores das populações e definir o resultado, ou seja, interpretar as características da anisotropia acústica do material em estudo, verificando se o valores médios de  $B_0$  obtidos nos 80 pontos estudados em todo material poderiam ser considerados iguais, dentro de um determinado grau de confiança (95%) ou de incerteza (5%).

O material pode ser definido como: isotrópico, condição em que os tempos longitudinais (tempos de propagação da onda ultrassônica polarizada na direção longitudinal da peça de aço 20 MnMoNi 55) e tempos transversais (tempos de propagação da onda ultrassônica polarizada na direção transversal da peça de aço 20 MnMoNi 55) são iguais proporcionando birrefringência acústica igual a zero. A outra condição ocorre quando fica comprovado que existe uma anisotropia acústica onde estes tempos longitudinais e transversais são diferentes. O valor do percentual de igualdade destes valores nos 80 pontos da superfície analisada determina a homogeneidade ou a heterogeneidade da peça dada pela anisotropia acústica da peça de aço 20 MnMoNi 55 estudada.

Para o cálculo da média da birrefringência em cada um dos 80 pontos, foi adotado um desvio padrão para cada ponto, sendo para o novo cálculo foram descartadas as médias que ficaram fora do desvio padrão. Com a obtenção da nova média dos valores das 80 médias de birrefringência e o respectivo desvio padrão, foi executada a ferramenta de análise ANOVA: FATOR ÚNICO.

Esta ferramenta, ANOVA: FATOR ÚNICO, de análise é uma extensão do teste t e permite verificar qual o efeito de uma variável independente de natureza qualitativa (fator – nominal ou ordinal), numa variável dependente de natureza quantitativa.

A comparação entre observações de mais de 2 grupos pode ser obtida através de sucessivas comparações dos grupos com o emprego do teste t independente, mas este procedimento aumenta muito a possibilidade de ocorrência do erro tipo II.

OBS.:

- Erro tipo I: rejeição de  $H_0$  quando é verdadeira;
- Erro tipo II: se aceita  $H_0$  quando esta é falsa;

Varição entre e intra grupos:

- Variação entre os grupos (between-group variation): diferença entre a média de um grupo em relação à média global (também chamado de efeito de cada grupo).
- Variação dentro dos grupos (within-group variation): diferença entre cada indivíduo em relação à média das observações do grupo ao qual pertence (também chamado de erro de amostragem).[16]

Teste F:

- É a razão da variação entre os grupos e a variação dentro dos grupos

$$F = \frac{\text{VARIÂNCIA ENTRE GRUPOS} / (k - 1)}{\text{VARIÂNCIA DENTRO DOS GRUPOS} / (n - k)} \quad (10)$$

- Serve para estimar as diferenças entre os dois componentes da variabilidade.
  - O teste F é um “superteste t” que permite a comparação de mais de duas médias simultaneamente.

Valores de F:

- F próximo de 1,0: as duas estimativas da variância são semelhantes e aceita-se  $H_0$ .
- F muito maior que 1,0: existe alguma força atribuível para as diferenças dos grupos e rejeita-se  $H_0$ .
- F calculado < F tabelado =  $H_0$  verdadeira

-  $F$  calculado  $>$   $F$  tabelado =  $H_0$  recusada

Graus de Liberdade:

-  $K - 1$  = número de grupos - 1

-  $N - k$  = número de observações - número de grupos

Pressupostos:

- As observações dentro de cada grupo tem distribuição normal;

- As observações são independentes entre si;

- As variâncias de cada grupo são iguais;

No anexo, será detalhado todo o cálculo do teste Anova: fator único.

Os valores das médias nos 80 pontos, utilizando-se do uso da média e do desvio padrão, que são apresentados na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Valores das médias das birrefringências nos 80 pontos, com a média e desvio padrão.

POSICÃO	VALOR	POSICÃO	VALOR	POSICÃO	VALOR	POSICÃO	VALOR
1A	-4,013646E-04	1B	-1,172077E-03	1C	-1,206646E-03	1D	-6,038243E-04
2A	-1,609580E-03	2B	-1,205546E-03	2C	-8,041817E-04	2D	-1,510209E-03
3A	-8,045052E-04	3B	-1,005756E-03	3C	-8,054772E-04	3D	-8,057207E-04
4A	-1,206030E-03	4B	-8,045862E-04	4C	-1,006725E-03	4D	-1,209434E-03
5A	-8,032129E-04	5B	-1,005025E-03	5C	-1,272866E-03	5D	-1,207486E-03
6A	-8,196251E-04	6B	-1,205546E-03	6C	-1,105770E-03	6D	-1,275645E-03
7A	-7,809388E-04	7B	-7,368883E-04	7C	-8,044243E-04	7D	-8,054772E-04
8A	-8,035356E-04	8B	-1,139334E-03	8C	-8,716192E-04	8D	-1,174459E-03
9A	-1,205471E-03	9B	-1,039708E-03	9C	-9,733819E-04	9D	-9,071338E-04
10A	-7,868143E-04	10B	-8,383478E-04	10C	-1,174508E-03	10D	-1,007536E-03
11A	-8,028904E-04	11B	-1,006036E-03	11C	-8,724067E-04	11D	-1,343504E-03
12A	-4,853450E-04	12B	-8,048560E-04	12C	-9,062993E-04	12D	-1,209027E-03
13A	-4,017896E-04	13B	-5,366697E-04	13C	-1,073384E-03	13D	-9,745549E-04
14A	-8,483918E-04	14B	-1,039676E-03	14C	-1,073258E-03	14D	-9,733054E-04
15A	-7,876043E-04	15B	-8,726634E-04	15C	-8,055539E-04	15D	-1,110094E-03
16A	-4,787759E-04	16B	-6,377799E-04	16C	-9,065427E-04	16D	-1,547472E-03
17A	-1,130491E-03	17B	-4,697852E-04	17C	-1,108111E-03	17D	-1,109497E-03
18A	-8,418325E-04	18B	-6,035003E-04	18C	-1,174837E-03	18D	-1,075825E-03
19A	-9,951253E-04	19B	-7,039309E-04	19C	-9,396604E-04	19D	-1,211269E-03
20A	-7,657257E-04	20B	-7,377419E-04	20C	-7,383541E-04	20D	-1,277655E-03

MÉDIA	-9,535955E-04
DESV.PAD.	2,526775E-04

Utilizando-se o programa Microsoft Excel, com todas as birrefringências e suas respectivas médias nos 80 pontos, através do ícone 'ferramentas', escolhe-se a análise de dados, onde solicita-se Anova: fator único, onde abre-se a caixa conforme a figura 4.7.

No intervalo de entrada, seleciona-se as 6 birrefringências de cada ponto escolhido que proporcionaram as respectivas médias nestas posições aleatórias onde acredita-se que estes valores possam ser considerados iguais. E, em alfa, coloca-se o nível de incerteza deste teste. Isso foi repetido a cada inclusão de uma posição, sendo retiradas no cálculo desta análise as posições que proporcionaram o resultado não esperado, com o F calculado maior que o F tabelado.

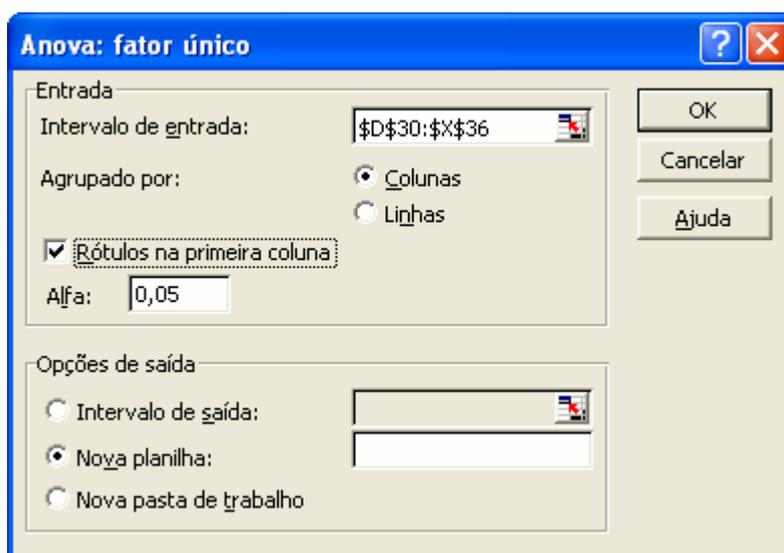


Figura 4.7 – Visualização da tela do programa de análise de dados que permite realizar o teste Anova: fator único.

Com a análise de todos os pontos, conseguiu-se o seguinte resultado, conforme a tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Resultado obtido utilizando-se o programa de dados do Microsoft Excel – Anova: fator único.

Anova: fator único

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
3A	6	-0,004827	-0,000805	1,69E-22
5A	6	-0,004819	-0,000803	0
7A	6	-0,004686	-0,000781	2,98E-09
8A	6	-0,004821	-0,000804	0
10A	6	-0,004687	-0,000781	1,02E-08
11A	6	-0,004817	-0,000803	1,69E-22
14A	6	-0,00509	-0,000848	1,92E-08
15A	6	-0,004692	-0,000782	2,99E-09
18A	6	-0,005089	-0,000848	1,2E-08
19A	6	-0,00576	-0,00096	2,45E-08
20A	6	-0,004556	-0,000759	3,35E-08
4B	6	-0,004827	-0,000805	1,75E-14
7B	6	-0,004555	-0,000759	1,2E-08
10B	6	-0,004829	-0,000805	7,2E-09
12B	6	-0,004829	-0,000805	7,2E-09
14B	6	-0,005768	-0,000961	4,62E-08
20B	6	-0,004695	-0,000782	4,62E-08
2C	6	-0,004825	-0,000804	0
3C	6	-0,004833	-0,000805	3,39E-22
7C	6	-0,004826	-0,000804	3,14E-14
8C	6	-0,004827	-0,000805	1,69E-22
11C	6	-0,004831	-0,000805	7,22E-09
16C	6	-0,004967	-0,000828	1,02E-08
19C	6	-0,004833	-0,000806	7,2E-09
3D	6	-0,004834	-0,000806	1,76E-14
7D	6	-0,004833	-0,000805	3,39E-22
9D	6	-0,005376	-0,000896	1,2E-08

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,82E-07	26	1,47E-08	1,520183	0,065468	1,577861
Dentro dos grupos	1,3E-06	135	9,65E-09			
Total	1,68E-06	161				

Este resultado mostra um valor de F calculado menor (1,520183) que o F tabelado (1,577861), proporcionando  $H_0$  verdadeira para estas posições apresentadas na tabela 4.13. Todos os 80 pontos apresentam birrefringência diferente de zero. Porém, apenas 27 das 80 posições são consideradas estatisticamente iguais, ou seja, apenas 33,75% das posições possuem uma birrefringência acústica considerada estatisticamente homogênea. Confirmando que o corpo-de-prova estudado possui uma característica acústicamente heterogênea.

#### 4.2.4 RESULTADOS E ANÁLISES DAS CONSTANTES ACUSTOELÁSTICAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO

A figura 3.13 mostra o corpo-de-prova definido para a obtenção da constante acustoelástica através dos ensaios de compressão. A superfície onde está escrito “U-S”, foi a superfície onde foi acoplado o transdutor ultrassônico para estes ensaios de compressão. Lembrando que, sempre o transdutor fora acoplado em todos os ensaios de compressão ou flexão na mesma superfície onde realizou-se os ensaios para análise da birrefringência acústica na peça de aço 20 MnMoNi 55, antes de ser submetida aos processos de usinagem para confecção dos respectivos corpos-de-prova.

A seguir, serão mostrados nas figuras 4.8 e 4.9 os gráficos do comportamento (birrefringência x tensão) obtidos nos dois ensaios de compressão nos respectivos corpos-de-prova do aço 20 MnMoNi 55.

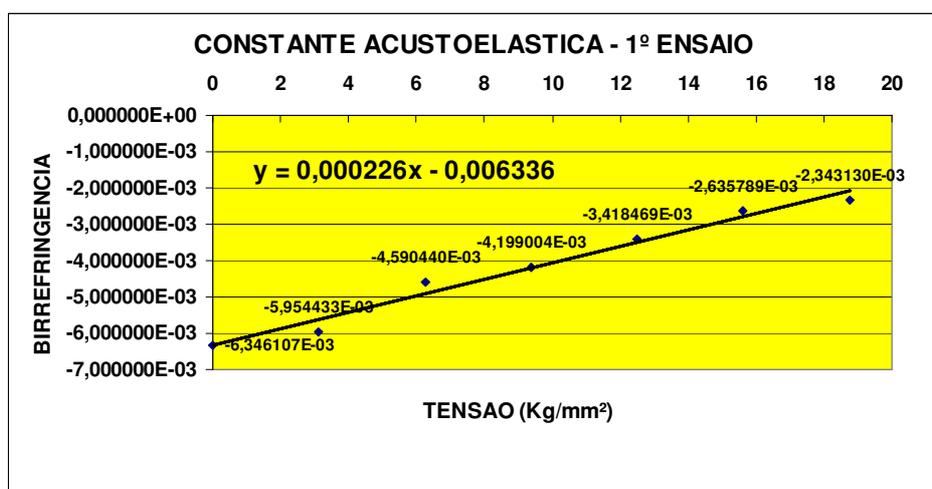


Figura 4.8 – Gráfico da da obtenção da constante acustoelástica - 1º ensaio.

A figura 4.8 mostra os resultados do 1º ensaio de compressão, que foi realizado com os respectivos carregamentos na direção da dimensão de 40 mm (conforme a figura 3.13). E esta direção adotou-se como direção transversal à direção longitudinal da peça de aço 20 MnMoNi 55.

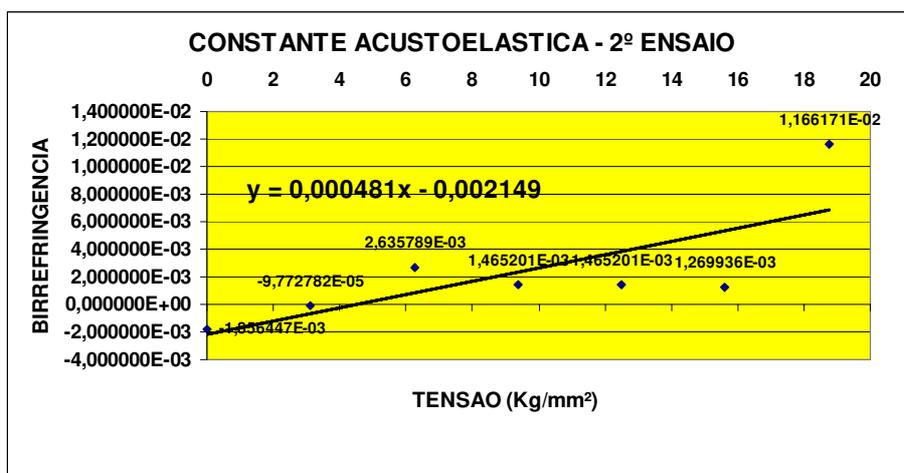


Figura 4.9 – Gráfico da obtenção da constante acustoelástica - 2º ensaio.

A figura 4.9 mostra os resultados do 2º ensaio de compressão, que foi realizado com os respectivos carregamentos na direção da dimensão de 60 mm (conforme a figura 3.13). E esta direção adotou-se como direção longitudinal da peça de aço 20 MnMoNi 55.

As figuras 4.10 e 4.11, mostram em gráficos (tempo x tensão aplicada) o comportamento dos tempos de percurso da onda ultrassônica com a polarização das ondas ultrassônicas paralelas (figura 4.10) e perpendiculares (figura 4.11) em relação à direção de carregamento nos dois ensaios de compressão.

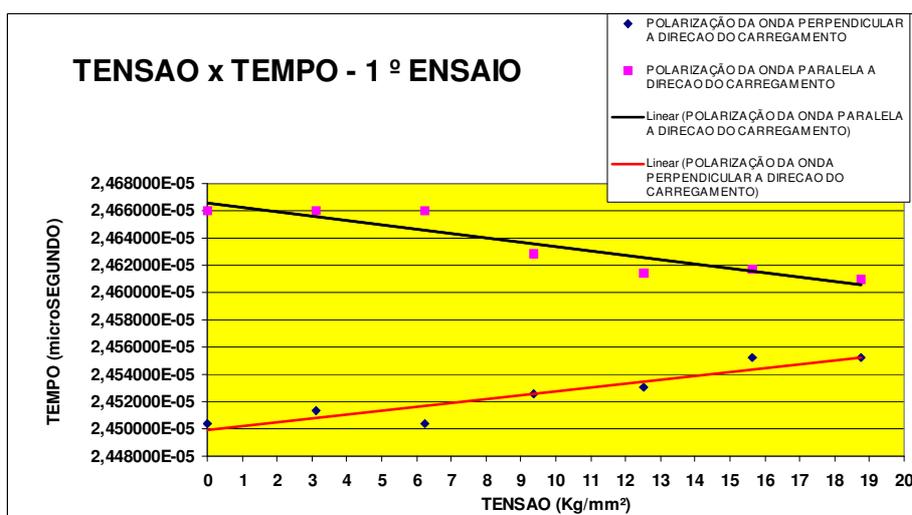


Figura 4.10 – Gráfico da tensão x tempo - 1º ensaio (carregamento na direção de 40 mm do C.P.).

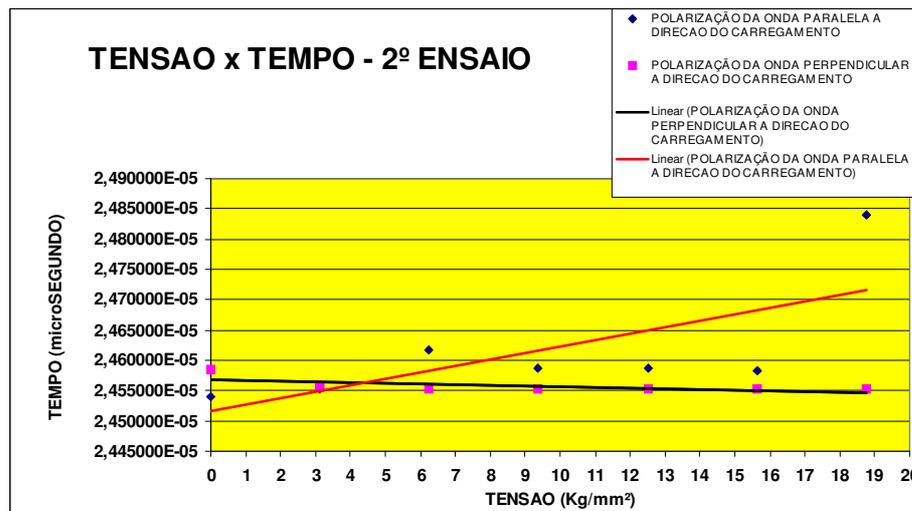


Figura 4.11 – Gráfico da tensão x tempo - 2º ensaio (carregamento na direção de 60 mm do C.P.).

Conclui-se que a constante acustoelástica apresentou valores diferentes nas duas direções de carregamento ortogonais entre si. E, que o comportamento dos sinais ultrassônicos em função da direção da polarização das ondas ultrassônicas em relação à direção de carregamento, nas duas direções de carregamento ortogonais entre si, foi diferente.

#### 4.2.5 RESULTADOS E ANÁLISES DOS TEMPOS E BIRREFRINGÊNCIAS ACÚSTICAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE FLEXÃO

Na tabela 4.14, são mostradas os tempos longitudinais e transversais e as respectivas birrefringências iniciais obtidas em cada ponto.

Tabela 4.14 – Tempos e birrefringências – ensaio de flexão (sem carregamento).

<b>SEM CARREGAMENTO</b>			
<b>POSIÇÃO C1 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C1 - 0,5 MHZ</b>	
5,877000E-05	5,865000E-05	2,043945E-03	
5,881000E-05	5,865000E-05	2,724332E-03	
5,878000E-05	5,865000E-05	2,214085E-03	
5,878000E-05	5,865000E-05	2,214085E-03	
5,878000E-05	5,865000E-05	2,214085E-03	
<b>5,878400E-05</b>	<b>5,865000E-05</b>	<b>2,282106E-03</b>	
<b>POSIÇÃO C2 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C2 - 0,5 MHZ</b>	
5,886000E-05	5,898000E-05	-2,036660E-03	
5,883000E-05	5,900000E-05	-2,885513E-03	
5,885000E-05	5,900000E-05	-2,545609E-03	
5,881000E-05	5,900000E-05	-3,225533E-03	
5,881000E-05	5,900000E-05	-3,225533E-03	
<b>5,883200E-05</b>	<b>5,899600E-05</b>	<b>-2,783770E-03</b>	
<b>POSIÇÃO C3 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C3 - 0,5 MHZ</b>	
5,907000E-05	5,913000E-05	-1,015228E-03	
5,907000E-05	5,914000E-05	-1,184333E-03	
<b>5,907000E-05</b>	<b>5,913800E-05</b>	<b>-1,150512E-03</b>	
<b>POSIÇÃO C4 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C4 - 0,5 MHZ</b>	
5,904000E-05	5,907000E-05	-1,185135E-03	
5,904000E-05	5,907000E-05	-1,015744E-03	
5,904000E-05	5,910000E-05	-1,185135E-03	
5,904000E-05	5,907000E-05	-1,015744E-03	
5,907000E-05	5,907000E-05	-1,015744E-03	
<b>5,904600E-05</b>	<b>5,907600E-05</b>	<b>-1,083500E-03</b>	
<b>POSIÇÃO C5 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C5 - 0,5 MHZ</b>	
5,8920000E-05	5,9000000E-05	-1,356852E-03	
5,8960000E-05	5,9000000E-05	-6,781960E-04	
<b>5,895200E-05</b>	<b>5,900000E-05</b>	<b>-8,139272E-04</b>	

Na tabela 4.15, são mostrados os tempos longitudinais e transversais e as respectivas birrefringências durante o carregamento de 28.000 kg (64% do limite de escoamento).

Tabela 4.15 – Tempos e birrefringências – ensaio de flexão (carregamento de 28.000 kg).

<b>CARREGAMENTO DE 28.000 Kg</b>		
<b>POSIÇÃO C1 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C1 - 0,5 MHZ</b>
5,856000E-05	5,868000E-05	-1,364489E-03
5,856000E-05	5,865000E-05	-1,364489E-03
5,856000E-05	5,865000E-05	-8,525876E-04
5,856000E-05	5,868000E-05	-8,528785E-04
5,856000E-05	5,868000E-05	-1,364489E-03
<b>5,856000E-05</b>	<b>5,866800E-05</b>	<b>-1,159787E-03</b>
<b>POSIÇÃO C2 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C2 - 0,5 MHZ</b>
5,877000E-05	5,895000E-05	-2,547771E-03
5,880000E-05	5,895000E-05	-2,547771E-03
5,880000E-05	5,895000E-05	-3,056546E-03
5,880000E-05	5,895000E-05	-2,547771E-03
5,880000E-05	5,895000E-05	-2,547771E-03
<b>5,879400E-05</b>	<b>5,895000E-05</b>	<b>-2,649526E-03</b>
<b>POSIÇÃO C3 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C3 - 0,5 MHZ</b>
5,907000E-05	5,910000E-05	-1,015228E-03
5,907000E-05	5,910000E-05	-1,015228E-03
5,907000E-05	5,910000E-05	-1,015228E-03
5,907000E-05	5,914000E-05	-1,015228E-03
5,907000E-05	5,910000E-05	-1,015228E-03
<b>5,907000E-05</b>	<b>5,910800E-05</b>	<b>-1,015228E-03</b>
<b>POSIÇÃO C4 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C4 - 0,5 MHZ</b>
5,907000E-05	5,918000E-05	-1,015228E-03
5,910000E-05	5,914000E-05	-1,015228E-03
5,907000E-05	5,917000E-05	0,000000E+00
5,907000E-05	5,914000E-05	-1,015228E-03
5,907000E-05	5,919000E-05	-1,015228E-03
<b>5,907600E-05</b>	<b>5,916400E-05</b>	<b>-8,121824E-04</b>
<b>POSIÇÃO C5 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C5 - 0,5 MHZ</b>
5,907000E-05	5,892000E-05	2,033554E-03
5,904000E-05	5,892000E-05	2,542588E-03
5,904000E-05	5,892000E-05	2,034588E-03
5,904000E-05	5,895000E-05	2,034588E-03
5,907000E-05	5,892000E-05	1,526329E-03
<b>5,905200E-05</b>	<b>5,892600E-05</b>	<b>2,034329E-03</b>

Na figura 4.16, são mostrados os tempos longitudinais e transversais e as respectivas birrefringências durante o carregamento de 42.000 kg (96% do limite de escoamento).

Tabela 4.16 – Tempos e birrefringências – ensaio de flexão (carregamento de 42.000 kg).

<b>CARREGAMENTO DE 42.000 Kg</b>			
<b>POSIÇÃO C1 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C1 - 0,5 MHZ</b>	
5,856000E-05	5,868000E-05	-2,047083E-03	
5,856000E-05	5,865000E-05	-1,535705E-03	
5,856000E-05	5,865000E-05	-1,535705E-03	
5,856000E-05	5,868000E-05	-2,047083E-03	
5,856000E-05	5,868000E-05	-2,047083E-03	
<b>5,856000E-05</b>	<b>5,866800E-05</b>	<b>-1,842532E-03</b>	
<b>POSIÇÃO C2 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C2 - 0,5 MHZ</b>	
5,877000E-05	5,895000E-05	-3,058104E-03	
5,880000E-05	5,895000E-05	-2,547771E-03	
<b>5,879400E-05</b>	<b>5,895000E-05</b>	<b>-2,649838E-03</b>	
<b>POSIÇÃO C3 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C3 - 0,5 MHZ</b>	
5,907000E-05	5,910000E-05	-5,077431E-04	
5,907000E-05	5,910000E-05	-5,077431E-04	
5,907000E-05	5,910000E-05	-5,077431E-04	
5,907000E-05	5,914000E-05	-1,184333E-03	
5,907000E-05	5,910000E-05	-5,077431E-04	
<b>5,907000E-05</b>	<b>5,910800E-05</b>	<b>-6,430611E-04</b>	
<b>POSIÇÃO C4 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C4 - 0,5 MHZ</b>	
5,907000E-05	5,918000E-05	-1,860465E-03	
5,910000E-05	5,914000E-05	-6,765900E-04	
5,907000E-05	5,917000E-05	-1,691475E-03	
5,907000E-05	5,914000E-05	-1,184333E-03	
5,907000E-05	5,919000E-05	-2,029427E-03	
<b>5,907600E-05</b>	<b>5,916400E-05</b>	<b>-1,488458E-03</b>	
<b>POSIÇÃO C5 - 0,5 MHZ</b>		<b>BIRREFRINGÊNCIA</b>	
<b>LONGITUDINAL</b>	<b>TRANSVERSAL</b>	<b>POSIÇÃO C5 - 0,5 MHZ</b>	
5,907000E-05	5,892000E-05	2,542588E-03	
5,904000E-05	5,892000E-05	2,034588E-03	
5,904000E-05	5,892000E-05	2,034588E-03	
5,904000E-05	5,895000E-05	1,525553E-03	
5,907000E-05	5,892000E-05	2,542588E-03	
<b>5,905200E-05</b>	<b>5,892600E-05</b>	<b>2,135981E-03</b>	

#### 4.2.5.1 COMPARAÇÃO DAS BIRREFRINGÊNCIAS ACÚSTICAS OBTIDAS ANTES E NOS CARREGAMENTOS DO ENSAIO DE FLEXÃO

Os resultados dos valores de  $B_0$  e  $B$  nos respectivos carregamentos (28.000 kg e 42.000 kg), são mostrados nas tabelas 4.14, 4.15 e 4.16, são calculados a partir dos tempos obtidos antes e nos dois carregamentos.

É apresentado nas figuras 4.12 e 4.13 o comportamento das birrefringências ( $B_0$  e  $B$ ) nos respectivos carregamentos, através dos valores das suas respectivas médias em cada ponto definido no corpo-de-prova, mostrando a distribuição da anisotropia do material. As birrefringências são expressas por gráficos de barras, permitindo uma visualização deste comportamento em todos esses pontos. As barras em azul representam a birrefringência do material antes do carregamento e as barras em vermelho as birrefringências nos respectivos carregamentos.

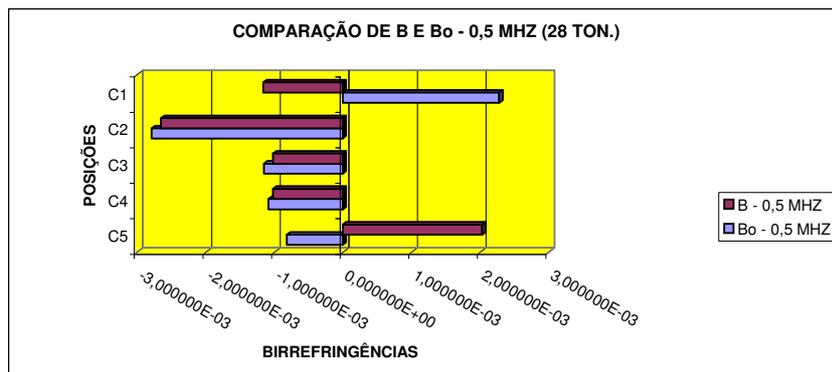


Figura 4.12 – Comparação entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento de 28.000 kg .

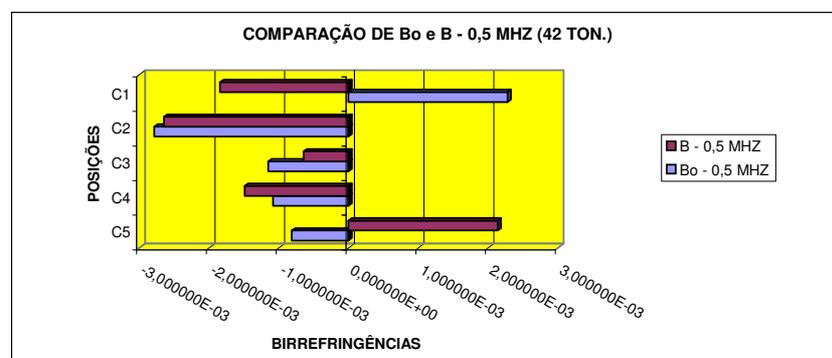


Figura 4.13 – Comparação entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento de 42.000 kg .

É possível verificar nestes gráficos das figuras 4.12 e 4.13 que durante os carregamentos existe nos pontos  $C_1$  e  $C_5$  uma alteração de comportamento com uma variação de  $B$  em relação à  $B_0$  muito mais acentuada, quando comparadas com as variações ocorridas nos pontos internos  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  para os dois carregamentos.

Quando a barra é submetida à flexão, são geradas regiões compressivas (valores negativos) e trativas (valores positivos). Lembrando que, teoricamente, o valor da birrefringência devido só a tensão obtido na região neutra (ponto  $C_3$ ) deve ser igual a zero (material homogêneo e isotrópico). E os resultados apresentaram uma leve tração nesta região nos dois carregamentos.

Nos gráficos das figuras 4.14 e 4.15 são apresentados os valores de  $(B - B_0)$ , nos respectivos carregamentos. Esta diferença indica que está sendo retirado o efeito da textura, ficando apenas o valor de anisotropia referente à tensão aplicada.

Analisando os valores de  $(B - B_0)$  em cada ponto no carregamento de 28.000 kg, conforme a figura 4.14, é possível verificar que o ponto  $C_1$  mostra uma região de considerada compressão. Já nos pontos  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  apresentam uma região de leve tração. No ponto  $C_5$ , verifica-se ser uma região trativa com valor elevado em relação às outras regiões internas.

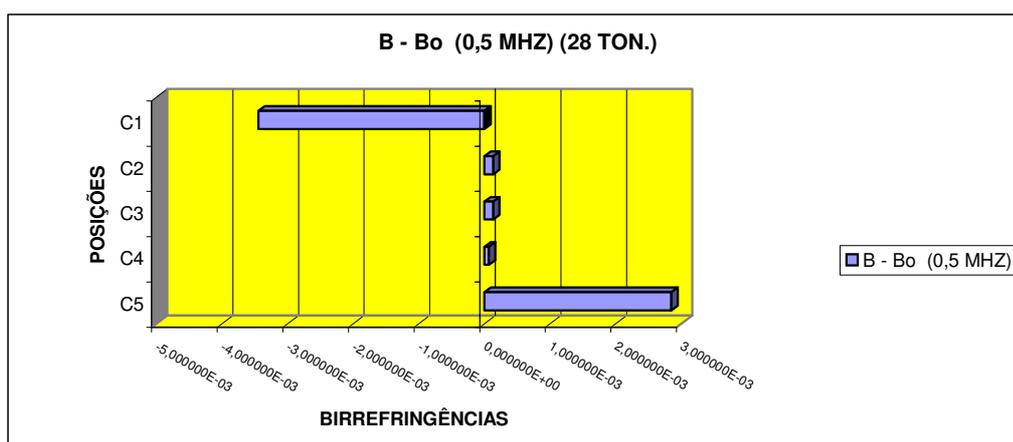
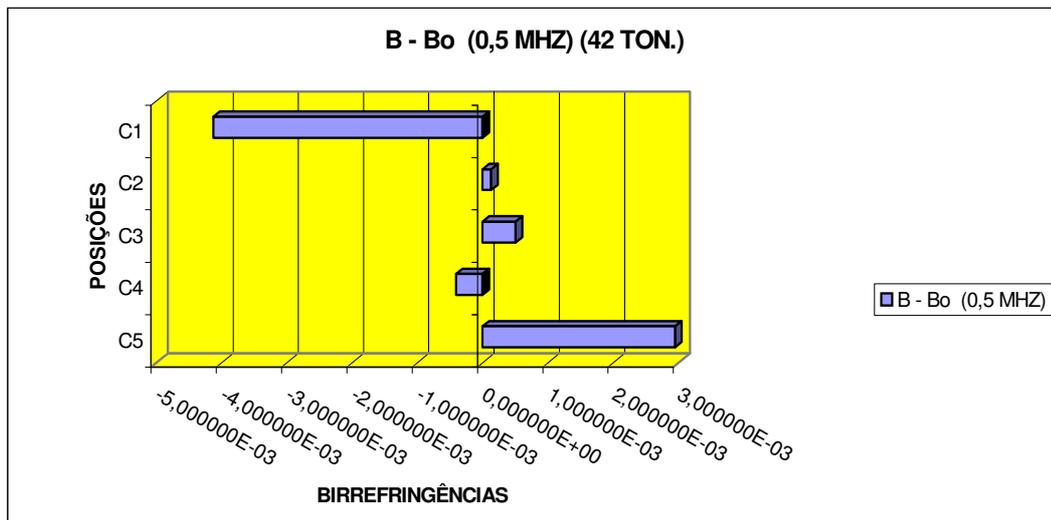


Figura 4.14 – Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento de 28.000 kg.

O mesmo é verificado no carregamento de 42.000 kg ao analisar os valores de  $(B-B_0)$ , conforme a figura 4.15. Foi identificado em relação ao carregamento anterior uma diferença de comportamento apenas em relação ao ponto  $C_4$ , onde no carregamento de 28.000 Kg apresentou um comportamento levemente trativo, enquanto que, neste carregamento o comportamento foi levemente compressivo. E o ponto  $C_3$ , a região tem um pequeno aumento no seu comportamento de tração.

Figura 4.15 – Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento de 42.000 kg.



O estado de tensão no regime trativo é o maior responsável pelo colapso prematuro dos materiais, devido à propagação de trincas. Por isso, se faz necessário numa análise identificar as regiões trativas e compressivas num determinado material.

#### 4.2.5.2 VALORES DAS TENSÕES OBTIDAS PELA TÉCNICA DA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA

Com os valores das birrefringências iniciais, as birrefringências finais nos respectivos carregamentos e a constante acustoelástica do material, é possível

obter a tensão aplicada de forma quantitativa em cada ponto da barra, através da equação da birrefringência, considerando nulas as tensões cisalhantes, conforme a equação 19.

$$B - B_0 = A(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (19)$$

A constante acustoelástica utilizada nesta equação para todos os pontos é aquela onde a direção do carregamento no ensaio de compressão coincide com a direção transversal à direção denominada longitudinal da peça de aço 20 MnMoNi 55, que tem o valor de  $2,26 \times 10^{-4}$ , obtida conforme mostrado na figura 4.8.

Tabela 4.17 – Valores das tensões nos 5 pontos em cada carregamento.

CARREGAMENTO 28.000 kg			CARREGAMENTO 42.000 kg		
POSIÇÃO	B-B <sub>0</sub>	( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) (Kgf/mm <sup>2</sup> )	POSIÇÃO	B-B <sub>0</sub>	( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) (Kgf/mm <sup>2</sup> )
C1	-3,536039E-03	-15,6462	C1	-4,218633E-03	-18,6665
C2	4,227760E-04	1,8707	C2	4,227760E-04	1,8707
C3	1,691050E-04	0,7482	C3	6,765899E-04	2,9937
C4	5,160000E-07	0,0022	C4	-6,756981E-04	-2,9898
C5	2,712439E-03	12,0000	C5	2,967840E-03	13,1273

Analisando os resultados apresentados na tabela 4.17, é possível dizer com os carregamentos consecutivos de 28.000 kg e 42.000 kg, que as regiões dos pontos C<sub>2</sub> e C<sub>4</sub> tem comportamentos diferentes entre si e em relação ao comportamento das demais regiões analisadas. Com o aumento da carga aplicada, o ponto C<sub>2</sub> não sofre alteração do valor da tensão nesta região, enquanto que, no ponto C<sub>4</sub> há uma alteração do comportamento trativo para compressivo destoando das demais regiões que apresentam uma elevação do valor da tensão devido ao primeiro carregamento.

Os resultados mostraram que a técnica da birrefringência acústica é capaz de diferenciar os estados de tensão trativa e compressiva de forma qualitativa e quantitativa.

É possível que, ao analisar apenas o efeito da anisotropia causada pela tensão (B - B<sub>0</sub>) e devido ao comportamento apresentado pelos valores de B<sub>0</sub> nos cinco pontos estudados, a heterogeneidade do material tenha influenciado na distribuição

da tensão como também é possível que os processos de usinagem e corte a que foi submetido o corpo-de-prova tenham provocado uma anisotropia maior nas regiões próximas às suas superfícies.

Dessa forma, neste trabalho ficou descartada a necessidade de verificar os valores das tensões obtidas pela teoria da resistência dos materiais nos pontos analisados, pois seriam cálculos baseados na análise de um material homogêneo e isotrópico. Devido às características do material em estudo, que mostrou-se anisotrópico e heterogêneo, seria inadequado o cálculo por esta teoria.



Figura 4.16 – Fotos do ensaio de flexão.

## ***CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES***

### **5.1 CONCLUSÕES**

Este trabalho apresenta na primeira experiência um estudo de duas metodologias de medida de tempo de percurso da onda ultrassônica para avaliação de tensão em materiais. E também, verifica a influência da variação da temperatura nas medidas de tempo do percurso da onda ultrassônica durante um ensaio de ultrassom, através da mesma técnica. Na segunda experiência, apresenta o estudo acustoelástico do aço 20 MnMoNi 55.

Conclusões da primeira experiência:

1 - A 1ª metodologia (Contínua) é melhor e mais indicada, pois também apresenta uma menor dispersão dos resultados. E, também, não houve influência da variação de temperatura nos resultados obtidos na faixa de temperatura estudada, onde a variação maior foi de 5°C, nas medidas longitudinais (polarização da onda ultrassônica alinhada longitudinalmente à peça de aço 20 MnMoNi 55) e de 6°C, nas medidas transversais (polarização da onda ultrassônica alinhada transversalmente à peça de aço 20 MnMoNi 55).

Conclusões da segunda experiência:

2 - Foi decidido pela aquisição de sinais em cada ponto através dos conjuntos de medidas com 10 sinais em cada direção.

3 – Foi mostrada a sensibilidade desta técnica ultrassônica que conseguiu perceber uma orientação cristalográfica, apesar deste aço 20 MnMoNi 55 ter sido provavelmente forjado e não laminado.

4 - Na análise da anisotropia do aço 20 MnMoNi 55, com o auxílio da estatística, foi confirmado que o corpo-de-prova estudado possui uma característica anisotropicamente heterogênea.

5 – A constante acustoelástica apresentou valores diferentes nas duas direções de carregamento ortogonais entre si.

6 - Os resultados mostram que a técnica de birrefringência acústica é capaz de diferenciar os estados de tensão trativa e compressiva de forma qualitativa e quantitativa.

## RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O material em estudo neste trabalho foi uma peça cedida pela NUCLEP/CNEN, sem haver um histórico dos processos de fabricação a que a mesma foi submetida, por isso, seria interessante repertir esta análise com o mesmo material com todo o seu histórico de fabricação para confirmar estes resultados. Nesse caso, seria necessário um contato com a NUCLEP para trabalhar em conjunto.

Recomenda-se verificar em análise de grandes espessuras de até 120 mm a utilização dos fatores de interpolação L2, L4 e L16 no cálculo para a aquisição dos sinais dentro do programa “Chronos V9”, visando melhorar os resultados.

Não foi possível verificar a influência do estado triaxial de tensões nos resultados, fica sugerido um aprofundamento sobre este assunto, em materiais com espessuras próximas às utilizadas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MORAES, M. M., *A Soldagem do Aço DIN 20 MnMoNi 55 pelo Processo Arco Submerso em Chanfro Estreito*. Tese de M.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1987.
- [2] DOLBY, R., SAUDERS, G., “A Review on the Problem of Heat Cracking in Nuclear Vessel Steel”, *Welding Institute*, Doc. 2453/1/75, 1975.
- [3] MARSHALL, W., “An Assessment of the Integrity of PWR Pressure Vessels – Second Report”, *United Kingdom Atomic Energy Authority*, 1982.
- [4] ANDREUCCI, R., *Ensaio por Ultra-som – Aplicação Industrial*. <http://www.infosolda.com.br/download/20ddr.pdf>. Acessado em janeiro de 2009.
- [5] SANTINI, J.L., *Ultra-som – Técnica e Aplicação*. Pró-End Consultoria - 2ª Edição, 2003.
- [6] LU, J., SOCIETY FOR EXPERIMENTAL MECHANICS, INC, [Chapter 7 – Ultrasonic Methods] “Handbook of Measurement of Residual Stress”. ISBN-0-88173-229-X, 1996.
- [7] DO CARMO, D.C., *Análise de Tensão por Ultra-som em uma Barra de Aço Estrutural sob Flexão*. Tese de M.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [8] HUGHES, D.S., KELLY, J.K., “Second Order Elastic Deformation of Solids”, *Physical Review*, v. 92, n. 5, pp. 1145-1149, Dec. 1953.
- [9] MINICUCCI, D. J., *Avaliação de tensões por ultra-som no aro de rodas ferroviárias forjadas novas – classe C*. Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP: Brasil, 2003.
- [10] SCHNEIDER, E., “Ultrasonic Birrefringence Effect – Its Application for Materials Characterisations”. *Optics and Lasers in Engineering*, v 22, n. 4, pp. 305-323, 1995.
- [11] Landa, M., Plesek, J. “Ultrasonic techniques for non-destructive evaluation of internal stress”. *Proceedings of 15° WCNDT*, 2000, Rome.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] BITTENCOURT, M.S.Q., MEDEIROS, R.C., LAMY, C.A., *et al*, “Avaliação por Ultra-som das Tensões Impostas em Tubo API X65”. *Rio Pipeline 2003 Conference and Exposition*, IBP452\_03, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 22-24 Outubro 2003.
- [15] STEVENSON, W. J., *Estatística Aplicada à Administração*, Editora Harbra Ltda, São Paulo, 1981.

[16] PESTANA, M.H.; GAGEIRO, J.N. *Análise de dados para ciências sociais. A complementaridade do SPSS. 3ª edição.* Ed. Sílabo. Lisboa – Portugal, 2003.

[17] MITEVA, R., TAYLOR, N.G., *et al*, “General Review of Dissimilar Metal Welds in Piping Systems of Pressurised Water Reactors, including Wwer Designs”. 2006, European Commission, EUR 22496 EM, INSSN 1018 - 5593 85-99141-01-5, Institute for Energy, Petten, The Netherlands, september, 2006.

[18] K, Aravind, *J-R Behaviour of 20MnMoNi55 Pressure Vessel Steel.* Tese de M.Sc., Department of Metallurgical and Materials Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2007-2009.

[19] TIMOSHENKO, S. P., *Resistência dos Materiais*, v.1, ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1971.